МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Миколаївський державний гуманітарний університет
ім. Петра Могили

В. Д. Евдокимов
Л. П. Клименко
А. Н. Евдокимова

ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Учебное пособие-справочник

Рекомендовано
Министерством образования и науки Украины
для студентов высших учебных заведений

Киев – 2006

УДК 621.002.3:621.789 (075.8)
ББК 34.43
Е 15

Рецензенты:
Гавриш А. П., *доктор технических наук, профессор,*
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»
Бирюков Б. Н., *доктор технических наук, профессор,*
Одесский национальный политехнический университет
Тарапата В. В., *кандидат технических наук, доцент,*
Одесская национальная морская академия

Рекомендован Министерством образования и науки Украины как справочник и учебное пособие для студентов технических учебных заведений (письмо № 14/18.2-2499 от 25.11.2004 г.).

Евдокимов В. Д., Клименко Л. П., Евдокимова А. Н.

Е 15 Технология упрочнения машиностроительных материалов: Учебное пособие-справочник / Под редакцией д.т.н., проф. В.Д. Евдокимова.— 2-е изд-е — К.: ИД «Профессионал», 2006. — 352 с.

ISBN 966-336-029-1

Приведены способы, режимы и примеры применения различных технологических процессов упрочняющей обработки материалов, которые используются в машиностроении для повышения надежности и качества изделий. Пособие-справочник охватывает широкий спектр упрочняющих технологий материалов — от сталей, чугунов и цветных металлов до пластмасс, стекла и дерева.
Предназначен для инженерно-технических работников машиностроительных и ремонтных предприятий, а также для преподавателей, аспирантов, технических учебных заведений; может быть полезен студентам старших курсов при выборе тем курсовых и дипломных проектов и работе над ними, а также при проведении научных магистерских исследований.

УДК 621.002.3:621.789 (075.8)

ББК 34.43

© Евдокимов В. Д., Клименко Л. П., Евдокимова А. Н., 2005

ISBN 966-336-029-1

© ИД «Профессионал», 2006

Уважаемые читатели и пользователи справочником!

Предлагаемый Вашему вниманию справочник составлен с использованием многочисленных литературно-технических источников и материалов заводского опыта. В эту книгу включены конкретные технологии повышения надежности различных машиностроительных материалов, начиная со сталей и вплоть до резин, пластмасс, стекла и дерева. Такой широкий охват упрочняемых материалов делает справочник достаточно универсальным и открывает, по нашему мнению, более широкие возможности выбора технологий для практических и учебных целей, чем существующие издания.

Обращаем Ваше внимание на то, что при работе над справочником перед нами возникла трудная задача определения авторства тех или иных технологических процессов, т.к. многие из них повторяются в различных источниках с различными авторами. Тем не менее, когда это было возможно, мы указывали авторов, номера патентов и проч.

При подборе материалов для этого справочника было просмотрено и обработано более тысячи источников. Но с целью более рационального использования объема книги мы их полностью не приводим, а в списке литературы указали ограниченное их число в основном для ориентации читателей. Это не значит, что мы игнорировали других авторов. Отнюдь нет! Поэтому заранее просим извинения у тех авторов технологий, фамилии которых не указаны в списке литературы или в тексте справочника. В связи с этим мы будем весьма признательны в получении от Вас ценных сведений, рекомендаций и предложений.

Учебное пособие-справочник может быть полезно инженерно-техническим и вузовским работникам, студентам технических учебных заведений при подготовке магистров, специалистов и бакалавров, а также аспирантам. Он может оказать существенную помощь преподавателям и студентам при выборе тем дипломных проектов и курсовых робот, а производственникам – при назначении эффективных технологий, повышающих качество выпускаемых изделий. Таким образом, возможности использования пособия-справочника достаточно широкие.

Коллектив авторов

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 6

Раздел I. УПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ 7

Глава 1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ 7

Глава 2. УПРОЧНЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ 9

Отжиг и нормализация сталей 9

Закалка сталей 12

Отпуск и старение закаленных сталей 31

Применение метода неравномерной термической обработки рабочих поверхностей и его использование применительно к блокам цилиндров и втулкам ДВС 37

Термообработка инструментов 40

Термообработка штампов 47

Термообработка сталей в контролируемых атмосферах 51

Правка деталей после термообработки 53

Контроль качества термообработки 54

Абразивная очистка поверхности заготовок после термообработки 56

Глава 3. УПРОЧНЕНИЕ КРИОГЕННЫМИ МЕТОДАМИ 58

Влияние криогенной обработки на структурные превращения и изменения физико-механических свойств стали 58

Особенности криогенной обработки технологической оснастки из различных сталей 60

Термообработка инструментальных сталей при криогенных температурах 63

Восстановление технологической оснастки методами криогенной обработки 64

Стабилизация форм и размеров деталей криогенными температурами 64

Источники криогенных температур 65

Приборы контроля криогенных температур 68

Глава 4. УПРОЧНЕНИЕ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ 69

Насыщение углеродом 69

Насыщение углеродом и азотом 77

Насыщение азотом 88

Цианирование твердыми карбюризаторами и пастами 101

Насыщение бором 103

Насыщение бором и серой 110

Насыщение бором и хромом 110

Насыщение бором и медью 114

Насыщение бором и алюминием 115

Насыщение бором и цирконием 116

Насыщение хромом 116

Насыщение хромом и титаном 120

Насыщение хромом и кремнием 120

Насыщение хромом и алюминием 122

Комплексное насыщение ванадием, титаном, цирконием, вольфрамом, ниобием, серой, алюминием, кремнием 122

Обработка быстрорежущего инструмента в атмосфере пара 135

Интенсификация процессов диффузионного насыщения 136

Глава 5. УПРОЧНЕНИЕ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ И РАСТВОРЕНИЯ ... 142
Хромирование ... 142
Никелирование ... 151
Электрофоретическое осаждение ... 158
Электрохимическое полирование ... 159
Электрохимическое оксидирование ... 163
Некоторые методы повышения производительности и улучшения качества гальванических покрытий ... 169
Глава 6. УПРОЧНЕНИЕ МЕТОДАМИ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ РАСТВОРОВ ... 171
Фосфатирование ... 171
Никелирование ... 176
Эпиламирование ... 197
Упрочнение твердыми смазками ... 198
Глава 7. УПРОЧНЕНИЕ МЕТОДАМИ ФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ КОНЦЕНТРИРОВАННОЙ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИЕЙ ... 201
Упрочнение методами лазерного воздействия ... 201
Упрочнение методами воздействия магнитным полем ... 206
Упрочнение сталей с применением магнитного поля и высокоскоростного трения ... 209
Упрочнение методами наплавки и напыления легирующими металлами ... 211
Повышение рабочих характеристик поверхностных слоев дейдвудных валов при их восстановлении ... 234
Упрочнение методами электроискровой обработки ... 241
Упрочнение методами ионно-плазменной обработки ... 247
Глава 8. УПРОЧНЕНИЕ МЕТОДАМИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ... 254
Упрочнение методами поверхностного пластического деформирования без использования внешней теплоты ... 254
Рекомендации по обработке поверхностей щетками ... 268
Упрочнение энергией взрыва ... 270
Упрочнение методами электромеханической пластической обработки ... 273
Эффективный метод упрочнения поверхностных слоев деталей машин ... 280
Поверхностное упрочнение металлических сплавов высокоскоростным знакопеременным трением с применением прерывистых фрикционных дисков ... 281
Раздел II. УПРОЧНЕНИЕ НЕМЕТАЛЛОВ ... 285
Глава 1. УПРОЧНЕНИЕ ТВЕРДОГО СТЕКЛА ... 285
Основные свойства стекла ... 285
Упрочнение термическими методами ... 288
Упрочнение химическими методами ... 295
Упрочнение методами механической обработки ... 300
Глава 2. УПРОЧНЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ ... 310
Основные процессы упрочнения ... 310
Сушка древесины ... 310
Пропитка древесины ... 317
Глава 3. УПРОЧНЕНИЕ ПЛАСТМАСС МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ ... 321
Подготовка пластмасс к металлизации ... 321
Химическое меднение пластмасс ... 326
Химическое никелирование пластмасс ... 329
Список литературы ... 335
Предметный указатель ... 341

ПРЕДИСЛОВИЕ

В учебном пособии-справочнике систематизированы сведения о технологических методах, способах и режимах упрочняющей обработки основных материалов – металлов и неметаллов. Источником информации являются многочисленные публикации, разобщенные в монографиях, справочниках, отраслевых инструкциях, специальных журналах и других изданиях, в описаниях отечественных и зарубежных изобретений, созданных за последние годы. В книгу вошли переработанные и значительно дополненные материалы справочника С.Н. Полевого и В.Д. Евдокимова "Упрочнение металлов", изданного в 1986 г.

Методы упрочняющей обработки классифицированы по степени влияния на конечное состояние упрочняемого материала. По каждому методу приведены данные о составах упрочняющих сред, приемах исполнения технологических процессов, оценке качества обработки, применяемости метода в конкретных производственных условиях. В необходимых случаях наряду с общедействующими описаны дополнительные рекомендации по безопасности и гигиене труда.

Учебное пособие-справочник предназначено для преподавателей, аспирантов и студентов высших и средних технических учебных заведений, а также рекомендуется мастерам, технологам промышленных предприятий, поскольку в нем систематизированы основные сведения о наиболее применяемых методах упрочняющей обработки материалов.

Авторы будут признательны за рекомендации и пожелания, направленные на улучшение справочника.

Раздел I

УПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Глава 1
КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Методы упрочнения металлов можно условно разделить на шесть основных классов (табл. 1). Методами одного класса осуществляются процессы различных типов.

Внешние условия протекания процессов неодинаковы: в газовой среде; в жидкости; в пасте; без использования или с использованием теплоты при нормальном, повышенном или высоком давлении; в низком, среднем или глубоком вакууме; в атмосфере водяного, водогазового или ионного пара; в контролируемых атмосферах экзогаза или эндогаза; в электропроводящей или диэлектрической среде; в среде с поверхностно-активными или абразивными свойствами; в магнитном, электрическом, гравитационном или термическом поле. Выбор сочетаний внешних условий и характеризует специфические особенности технологических процессов.

Любой экономически обоснованный метод упрочнения требует проверки типовой технологии в конкретных условиях для каждого вида упрочняемого изделия. Применяемость метода определяют по основным факторам, характеризующим внешние и внутренние условия эксплуатации упрочненных изделий и технико-экономические возможности использования метода в сложившихся условиях и в перспективном периоде. В каждом конкретном случае для каждого вида упрочняемого изделия на выбор и принятие обоснованного решения о целесообразности использования метода упрочнения влияет своя, специфическая, группа факторов. Наиболее полная оценка приемлемости метода для данных условий возможна в том случае, если рассматривается наиболее полное число факторов и связи между ними. С этой целью рационально изучить и классифицировать основные факторы, действующие в данных конкретных условиях.

Внедрение технологии упрочняющей обработки требует проведения большого комплекса подготовительных работ. В их числе – определение номенклатуры изделий, деталей и поверхностей, упрочнение которых целесообразно и необходимо; выбор наиболее эффективного, экономически оптимального метода упрочнения, его экспериментальная проверка в лабораторных условиях; подготовка материальной базы – приобретение и изготовление стандартизованного и нестандартизованного оборудования, различных приборов и инструментов; подготовка производственных помещений и коммуникаций; накопление основных и вспомогательных материалов; обучение кадров, комплектование специализированных служб и производств, разработка технической документации и др.

1. Классификация методов упрочнения металла

Класс методов упрочнения	Метод	Типы процессов
1. Упрочнение созданием пленки на поверхности изделия	Осаждение химической реакции	Химическое оксидирование, никелирование, сульфидирование, кадмирование, фосфатирование, нанесение упрочняющего смазочного материала, осаждение из газовой фазы
	Электролитическое осаждение	Электролитическое хромирование, никелирование, никельфосфатирование, борирование, борохромирование, хромофосфатирование
	Осаждение твердых осадков из паров	Электроискровое легирование, катодно-ионная бомбардировка, прямое электроннолучевое испарение, реактивное электроннолучевое испарение, электрохимическое испарение, термическое испарение тугоплавких соединений
	Напыление износостойких соединений	Плазменное напыление порошковых материалов, детонационное напыление, электродуговое напыление, лазерное напыление
2. Упрочнение изменением химического состава поверхностного слоя металла	Диффузионное насыщение	Химико-термическое нитрооксидирование, нитроцементация, цементация, карбонитрация, карбохромирование, азотирование, хромоазотирование, хромотитанирование, хромосилицирование, хромоалитирование, борохромирование, борирование, цианирование, сульфоцианирование, диффузионное хромирование, диффузионное никелирование, циркосилицирование, бороцирконирование, легирование маломощными пучками ионов
3. Упрочнение изменением структуры поверхностного слоя	Физико-термическая обработка	Лазерная закалка, плазменная закалка
	Электрофизическая обработка	Электроимпульсная обработка, электроконтактная обработка, электроэрозионная обработка, ультразвуковая обработка
	Механическая обработка	Упрочнение вибрацией, фрикционно-упрочняющая обработка, дробеструйная обработка, обработка взрывом, термомеханическая обработка, прокатывание, волочение, редуцирование, термопластическая обработка
	Наплавка легированного металла	Наплавка газовым пламенем, электрической дугой, плазмой, лазерным лучом, пучком ионов
4. Упрочнение изменением энергетического запаса поверхностного слоя	Обработка в магнитном поле	Обработка: электроферромагнитная, в импульсном магнитном поле
5. Упрочнение изменением шероховатости поверхности	Электрохимическое полирование	Окунание в ванну (в струе электролита)
	Обработка резанием	
	Пластическое деформирование	Шлифование, суперфиниширование, хонингование Накатка, раскатка
6. Упрочнение изменением структуры всего объема металла	Термическая обработка при положительных температурах	Закалка: светлая, несквозная, сквозная, изотермическая, с самоотпуском, с подстуживанием, с непрерывным охлаждением и ступенчатая. Отпуск высокий и низкий
	Криогенная обработка	Закалка с обработкой холодом от температуры закалки или охлаждение от нормальной температуры, термоциклирование

При всей условности такой классификации она позволяет выбрать принципиальные направления, процессы и методы упрочняющей обработки в зависимости от исходных требований к работоспособности изделия. В необходимых слу-

чаях ею можно воспользоваться как инструментом для создания новых, оригинальных технологических процессов путем комбинирования и перемещения методов и условий выполнения известных способов.

Глава 2
УПРОЧНЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Отжиг и нормализация сталей

Отжиг. Для получения структур, близких к равновесному состоянию, применяют отжиг – нагрев стали до заданной температуры, выдержку при ней и последующее медленное охлаждение. В процессе отжига улучшаются механические свойства и выравнивается химический состав стали, улучшается обрабатываемость ее на станках, уменьшаются остаточные деформации, осуществляется подготовка структуры стали для последующей термической обработки, изменяются свойства наклепанного металла. Поэтому отжиг как технологическая операция включается составной промежуточной частью в большинство комплексных технологических процессов упрочняющей обработки.

Проведение отжига способствует достижению заданных конечных свойств стали, упрочняемой другими методами обработки.

Различают следующие виды отжига: рекристаллизационный, полный, неполный; отжиг на зернистый перлит (сфероидизация); изотермический, низкотемпературный; диффузионный (гомогенизация).

Рекристаллизационный отжиг применяют для снятия наклепа холоднодеформированного металла. Нагрев при рекристаллизационном отжиге сталей марок У7, У8, У9, У10, У11, У12, У13, Х, 9ХС, ХВГ, 7Х3, ХВ4, 6ХВ2С осуществляют при температуре 670-700 °С; марок Х12, Х12М, Х12Ф1 – при 730-750 °С; марок Р18, Р9 – при 760-780 °С. Не более 1 ч детали выдерживают при температуре рекристаллизации.

Полный отжиг применяют для уменьшения твердости, снятия напряжений и исправления структуры после ковки в случае неправильного нагрева для охлаждения технологической оснастки, изготовленной из доэвтектоидных и эвтектоидных сталей. В результате полного отжига происходит полная перекристаллизация металла, структура получается мелкозернистая с равномерным распределением перлита и феррита. При полном отжиге сталь нагревают до температуры, превышающей температуру, соответствующую точке Ac_3 (рис. 1) диаграммы железо-углерод (см. табл. 25), на 20-30 °С, выдерживают до полного прогрева, после чего охлаждают медленно до 600 °С, а затем – с любой скоростью.

Неполному отжигу подвергают доэвтектоидную сталь, прошедшую правильный режим ковки. При этом сталь нагревают до температуры, находящейся между точками Ac_1 и Ac_3, и выдерживают до полного прогрева. Режим охлаждения такой же, что и при полном отжиге.

Отжиг на зернистый перлит применяют для снижения твердости, улучшения обрабатываемости и подготовки структуры стали к последующей закалке.

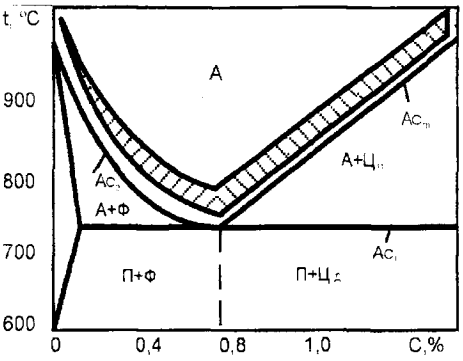


Рис. 1. Диаграмма температур нагрева при нормализации: А – аустенит; П – перлит; Ф – феррит; $Ц_{II}$ – вторичный цементит

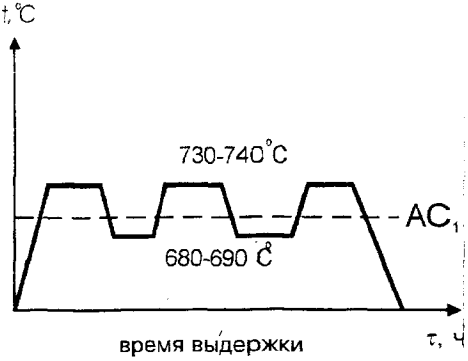


Рис. 2. Схема циклического режима отжига

При таком отжиге проводят нагрев выше температуры Ac_1 на 10-25 °С и выдерживают при этой температуре до полного прогрева. Отжиг на зернистый перлит можно проводить по циклическому режиму (рис. 2). Отжигаемые изделия несколько раз попеременно выдерживают при температуре, которая на 15-20 °С выше или ниже точки Ac_1, после чего охлаждают с печью до температуры 550 °С.

Изотермический отжиг применяют для обработки легированных и высокоуглеродистых сталей. Назначение его такое же, что и назначение полного отжига. При изотермическом отжиге доэвтектоидную сталь нагревают до температуры выше точки Ac_3 на 30-50 °С, а заэвтектоидную сталь – на 30-50 °С выше точки Ac_1. Выдерживают до полного прогрева, затем быстро охлаждают до температуры несколько ниже точки Ac_1, выдерживают при этой температуре, после чего охлаждают с любой скоростью. Для проведения изотермического отжига требуется меньше времени, чем для полного отжига. Для быстрого охлаждения изделие переносят в печь с меньшей температурой или охлаждают при открытой дверце с последующим выравниванием температуры. Режимы изотермического отжига приведены в табл. 1.

Низкотемпературный отжиг применяют для снижения твердости и снятия внутренних напряжений в технологической оснастке из заэвтектоидных сталей. Изделие нагревают до температуры, которая на диаграмме несколько ниже линии Ac_1 [примерно до температуры 680 °С (температура отпуска)], выдерживают до полного прогрева, затем охлаждают вместе с печью или на воздухе. Процесс называют отжигом условно.

Диффузионный отжиг применяют для крупных литых кубиков из штампованных сталей. При этом изделия нагревают выше Ac_3 на 150-250 °С и после длительной выдержки медленно охлаждают с печью. Цель процесса – устранение химической неоднородности и грубой структуры литых сталей. После диффузионного отжига необходим полный отжиг для устранения структурных изменений, вызванных перегревом.

Для выбора режимов отжига различных инструментальных сталей следует пользоваться данными табл. 25. Скорость нагрева при отжиге должна быть та-

1. Режимы изотермического отжига инструментальных сталей

Сталь	Температура, °С		Твердость НВ
	Нагрева	Изотермической выдержки	
У9, У10	740—750	600—650	170—197
У11, У12, У13	750—780	620—660	187—207
Х, ХВГ	770—800	670—720	190—228
9ХС, Х12М, Х12Ф1	850—870	720—750	217—255
Р18, Р9	830—850	720—750	217—255

кой, при которой обеспечивается равномерный нагрев всей садки, и для углеродистой и легированной стали принимается равной 100 °С/ч; для высокохромистой и быстрорежущей стали – равной 50 °С/ч.

Выдержка при отжиге составляет 1-2 ч в камерных печах и 2-4 ч в шахтных невентилируемых печах (из-за замедленного прогрева центральной части партии заготовок). Время выдержки в камерных печах отсчитывают от момента достижения температуры печи, равной температуре окончательного нагрева и определяемой по показаниям приборов. До этого момента происходит выравнивание температуры по всему объему садки.

Охлаждение после отжига проводят по одной из двух технологических схем:

I схема – непрерывное охлаждение с печью до температуры 500 °С со скоростью 50 °С/ч для углеродистых сталей и 25-30° С/ч – для легированных и быстрорежущих; дальнейшее охлаждение проводят на воздухе, скорость его охлаждения не регламентируется. Отжиг с непрерывным охлаждением проводят в камерных и шахтных печах при общей массе партии заготовок более 300 кг;

II схема – охлаждение с изотермической выдержкой, дальнейшее охлаждение до температуры 500 °С с печью, а затем на воздухе. Охлаждение от температуры отжига до температуры изотермической выдержки при этой схеме не регламентируется. Оно проводится при выключенной печи. Дверцы открывать запрещается во избежание неравномерного охлаждения заготовок. Время на охлаждение с изотермической выдержкой составляет 1-2 ч для углеродистой стали, 3-4 ч для легированной и 3-8 ч для быстрорежущей. Изотермический отжиг следует проводить в камерных или шахтных печах с программным регулированием температуры.

Детали из сталей У7, У7А, У8, У8А, У10, У10А, У12, У12А сечением до 8 мм^2 (метчики сечением до 12 мм^2) охлаждают в расплаве солей или щелочей, а сечением более 8 мм^2 – в 5-10%-м водном растворе поваренной соли или щелочи до температур, указанных в табл. 1. Отжиг инструмента из быстрорежущей стали в карбюризаторе или в чистом древесном угле не разрешается, так как при этом происходит поверхностное науглероживание, в результате чего в процессе последующей закалки оплавляются режущие кромки. Отжиг такого инструмента проводят в контролируемой атмосфере, в отработанном карбюризаторе либо в угле с добавлением 10-15% кальцинированной соды.

Нормализация. Процесс нагрева стали на 30-50 °С выше температур, соответствующих линии Ac_3 (см. рис. 1); выдержку при этой температуре и последующее охлаждение на спокойном воздухе называют нормализацией.

Нормализацию применяют, в основном, для снятия внутренних напряжений и улучшения обрабатываемости стали. Практически температуру нормализации углеродистых сталей можно выдерживать в пределах, указанных в табл. 2.

2. Температура нагрева сталей при нормализации

Содержание С, %	$t_{норм}$, °С	Содержание С, %	$t_{норм}$, °С
0,1	От 920 до 940	0,8	От 775 до 790
0,2	» 890 » 910	1,0	» 830 » 850
0,4	» 850 » 870	1,2	» 900 » 920
0,6	» 800 » 820	1,4	» 950 » 970

Примечание. С – углерод; $t_{норм}$ – температура нагрева при нормализации.

Закалка сталей

Способы закалки. Операцию, при которой доэвтектоидную сталь нагревают на 20-30 °С выше температур, соответствующих линии Ac_3, а эвтектоидную и заэвтектоидную стали – на 20-30 °С выше линии Ac_1 и после выдержки при этой температуре быстро охлаждают в воде, масле или на воздухе (в зависимости от состава стали), называют *закалкой* (рис. 3).

В результате закалки получают неравномерные структуры, так как быстрое охлаждение препятствует фазовым превращениям. После закалки сталь становится твердой и хрупкой. Структура закаленной стали состоит из мартенсита, нерастворившихся карбидов и остаточного аустенита. Заэвтектоидную сталь не следует нагревать перед закалкой до температур, находящихся на диаграмме выше линии Ac_m, так как при этой температуре происходит перегрев стали и снижается качество технологической оснастки. Способы закалки отличаются условиями нагрева и охлаждения стали. Выбор способа закалки зависит от состава стали, требуемых свойств и сложности изделий.

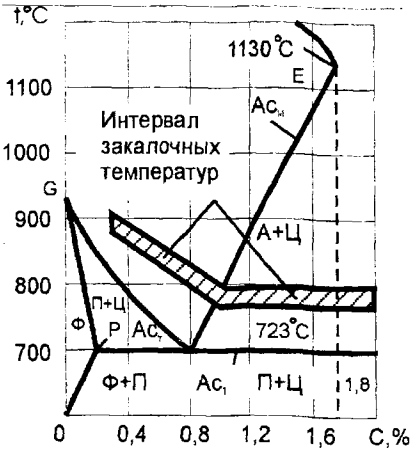


Рис. 3. Диаграмма закалочных температур для углеродистых сталей

Различают следующие способы закалки: полную, неполную, с непрерывным охлаждением, изотермическую, ступенчатую, с подстуживанием, проводимую в двух жидких средах или с ограниченным пребыванием в охлаждающей среде, с самоотпуском, сквозную, несквозную, обычную, чистую, светлую, с обработкой холодом. Сочетание способов позволяет создать в закаленной стали структуру, наиболее отвечающую требованиям работоспособности изделия.

При *полной закалке* температура нагрева должна быть выше критических точек Ac_3 или Ac_1; при *неполной закалке* должна находиться в интервале закалочных температур. Если закалку проводят со скоростью охлаждения выше критиче-

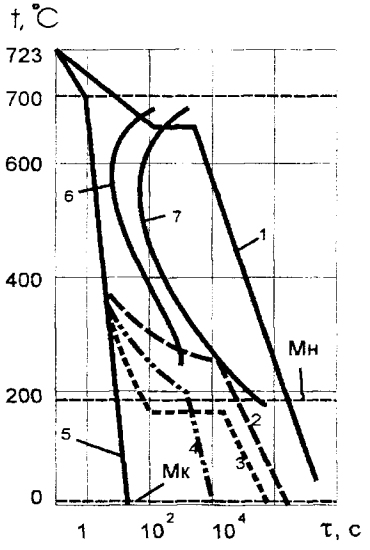


Рис. 4. Кривые охлаждения при различных способах термической обработки стали: 1 – изотермический отжиг; 2 – изотермическая закалка; 3 и 4 – ступенчатая закалка при температуре соответственно ниже и выше мартенситной точки; 5 – обычная закалка; 6 и 7 – соответственно начало и конец фазовых превращений

ской, то структура стали после охлаждения состоит из мартенсита и остаточного аустенита, а если проводят со скоростью охлаждения ниже критической, то – из ферритокарбидной смеси различной степени дисперсности (сорбит и троостит закалки).

Закалку с непрерывным охлаждением проводят в воде, масле и других средах, причем температура среды должна быть ниже точки начала мартенситного превращения $M_н$ (рис. 4); на рисунке $M_к$ – температура конца мартенситных превращений.

Режимы закалки и отпуска конструкционных сталей приведены в табл. 3; коррозионно-, кислото- и окалиностойких – в табл. 4; теплостойких – в табл. 5; пружинных – в табл. 6; цементуемых – в табл. 7.

3. Режимы термической обработки конструкционных сталей

Марка стали	Закалка			Отпуск	
	Температура нагрева, °С		Охлаждающая среда	Температура, °С	Охлаждающая среда
	Первая закалка или нормализация	Вторая закалка			
Углеродистые стали					
30	870	-	Вода	250	Воздух
40	840	-			
45	830	-		450 350 250 160	
50	810	-		500	

Продолжение табл. 3

Марка стали	Закалка			Отпуск	
	Температура нагрева, °С		Охлаждающая среда	Температура, °С	Охлаждающая среда
	Первая закалка или нормализация	Вторая закалка			
Хромистые стали					
15Х, 15АХ, 20Х	880	770-820	Вода или масло	180	Вода или масло
30Х	860	-	Масло	500	Вода или масло
30ХРА	900	860	Воздух	200	Воздух
35Х 38ХА 40Х	860	-	Масло	500 550 500	Вода или масло
45Х 50Х	840 830			520 520	
Марганцовистые стали					
15Г, 20Г	880	-	Воздух	-	-
25Г				560	Вода или масло
30Г, 35Г, 40Г	860	-	Вода или воздух	600	Воздух
45Г, 50Г	850	-			
10Г2	920	-	Воздух	-	-
30Г2	880	-	Масло или воздух	600	Воздух
35Г2 40Г2 45Г2 50Г2	870 860 850 840	- - - -		650	
Хромомарганцевые стали					
18ХГ 18ХГТ 20ХГР	880 880-950 880	- 870 -	Масло (при 950 °С – воздух)	200	Воздух или масло
27ХГР	870	-			Воздух
25ХГТ, 30ХГТ 40ХГТР 35ХГФ	850 840 870	850 - -		550 630	Вода или масло
25ХГМ	860	-	-	200	Воздух
Хромокремниевые стали					
33ХС	920	-	Вода или масло	630	Вода или масло
38ХС 40ХС	900	-	Масло	630 540	Масло

Изотермическая закалка при 900-910 °С в селитре при 300-350 °С, затем охлаждение на воздухе.

Продолжение табл. 3

Марка стали	Закалка			Отпуск	
	Температура нагрева, °С		Охлаждающая среда	Температура, °С	Охлаждающая среда
	Первая закалка или нормализация	Вторая закалка			
Хромомолибденовые и хромомолибденованадиевые стали					
15ХМ	800	-	Воздух	650	Воздух
20ХМ			Вода или масло	500	
30ХМ, 30ХМА			Масло	540	Вода или масло
35ХМ	850			560	
38ХМ				580	Воздух
30Х3МФ	870			620	Вода или масло
40ХМФА	860			580	Масло
Хромованадиевые стали					
15ХФ	880	760-810	Вода или масло	180	Воздух или масло
40ХФА		-	Масло	650	Вода или масло
Никель-молибденовые стали					
15Н2М 20Н2М	860	770-820 -	Масло	180	Воздух
20ХН	820	760-810	Вода или масло	180	Вода или масло
40ХН		-		500	
45ХН, 50ХН				530	
Хромоникелевые и хромоникелевые с бором стали					
20ХРН	930-950	780-830	Масло	200	Воздух или масло
12ХН2 12ХН3Л	860	760-810		180	
20ХН3А	820	-	Масло	500	Вода или масло
12Х2Н4А 20Х2Н4А	860	760-800 780		180	Воздух или масло
30ХН3А	820	-		530	Вода или масло
Хромокремнемарганцевые и хромокремнемарганцевоникелевые стали					
20ХГСА 25ХГСА	880	-	Масло	500 480	Вода или масло
30ХГС 30ХГСА				540	

Изотермическая закалка при 880 °С в смеси калиевой и натриевой селитр, имеющей температуру 280-310 °С; охлаждение на воздухе

Продолжение табл. 3

Марка стали	Закалка-			Отпуск	
	Температура нагрева, °С		Охлаждающая среда	Температура, °С	Охлаждающая среда
	Первая закалка или нормализация	Вторая закалка			
35ХГСА	950 700	890	Воздух	230	Воздух или масло
30ХГСН2А	900	-	Масло	260	

Хромомарганцевоникелевые и хромомарганцевоникелевые с титаном и бором стали

15ХГН2ТА	960	840	Масло	180	Воздух или масло
20ХГНР 20ХГНТР	930-950 -	780-830 850		200	Масло
38ХГН	850	-		570	Вода или масло

Хромоникель-молибденовые стали

14Х2Н3МА	880	770	Масло	180	Воздух
20ХН2М	860	780		200	Вода или масло
30ХН2МА		-		530	Воздух
38Х2Н2МА	870	-		580	Воздух или масло
40ХН2МА	850	-		620	Вода или масло
40Х2Н2МА	870	-		600	
38ХН3МА	850	-		590	Воздух
18Х2Н4МА	950	860	Воздух или масло	200	Воздух или масло
25Х2Н4МА	850	-	Масло	560	Масло

Хромоникель-молибденовые и хромоникель-ванадиевые стали

30ХН2МАФА	860	-	Масло	680	Воздух
36Х2Н2МФА 38ХН3МФА	850	-		600	
45ХН2МФА	860	-		460	Масло
20ХН4ФА	850	-		630	Вода

Хромоалюминиевые и хромоалюминиевые с молибденом стали

38Х2Ю 38Х2МЮА	930 940	- -	Вода или масло	630 640	Вода или масло

4. Режимы термической обработки коррозионно-стойких, кислотостойких и окалиностойких сталей

Сталь	Закалка		Температура отпуска (охлаждение на воздухе), °С	Твёрдость HRC
	Температура нагрева, °С	Охлаждающая среда		
12Х13	950-1050	Масло	500-550	-
20Х13			550-600	-
30Х13	1000-1050		200-225 200-300	48-50 50-55
40Х13			550-600	-
95Х18	1000-1075		200-225 275-300	57-60 52-55
14Х17Н2			250-300 540-560	36-42 30-35
17Х18Н9	1000-1050	Воздух	-	-
	1050-1100	Вода		
12Х18Н9Т	1100-1150			18
06Х18Н11 08Х18Н12Т	1050-1100			
36Х18Н25С2		Воздух		
45Х14Н14В2М	1150-1200	Вода	-	-
40Х9С2	1000-1050	Масло	800-830	-
40Х10С2М	1100-1150	Вода	750-780	-

5. Режимы термической обработки теплостойких сталей

Сталь	Температура нагрева, °С	Охлаждающая среда	Температура отпуска или старения, °С
12МХ	Нормализация 910-930	Воздух	670-690
12Х1МФ	Нормализация 960-980		700-750
20Х1М1Ф1ТР	Закалка 970-990	Масло	680-720
20Х1М1Ф1БР	Нормализация 1030-1050	Воздух	600 (ступенчатый отпуск, 3 ч) 700-720 (6 ч)
25Х1МФ	Закалка для варианта: I – 880-900 II – 930-950	Масло	640-660 620-660
25Х2М1Ф	Нормализация для варианта: I – 1030-1050 II – 950-970	Воздух	680-720
18Х3МВ	Закалка 950-970	Масло	660-680
20Х3МВФ	Закалка 1030-1060	Масло	660-700
15Х5 15Х5М 15Х5ВФ ~~12Х8ВФ~~	Отжиг 840-860	С печью	-

6. Режимы термической обработки пружинных сталей общего назначения (температура, °С)

Сталь	Температура закалки	Охлаждающая среда (температура среды)	Температура отпуска
65	840	Масло	480
70	830		
75	820		
85			
У9А	760-790	Масло (790-810) или вода (760-770)	300-420
У10А, У12А	770-810		
60Г	840	Масло	480
65Г, 70Г	830		
55ГС, 50С2, 55С2, 55С2А	870	Масло или вода	460
60С2, 60С2А		Масло	420
70С3А	860		460
50ХФА, 50ХГФА	850		520
60С2ХФА			410
65С2ВА			420
60С2Н2А	880		
70С2ХА	870		

7. Режимы термической обработки конструкционных цементуемых сталей

Сталь	Операция	Температура нагрева, °С	Сталь	Операция	Температура нагрева, °С
10	Цементация Закалка в масле Отпуск	900-920 780-800 180-200	18ХГ	Цементация Закалка в масле Отпуск	880-900 800-820 180-200
20	Цементация Закалка в масле Отпуск	900-920 780-800 180-200	15ХФ	Цементация Закалка в масле Отпуск	920-940 850-860 180-200
15Г	Цементация Закалка в масле Отпуск	880-900 780-800 180-200	20ХГР	Цементация Закалка в масле Отпуск	900-930 830-850 180-200
20Г	Цементация Закалка в масле Отпуск	880-900 780-800 180-200	18ХГТ	Цементация Закалка в масле Отпуск	900-920 800-820 180-200
15Х	Цементация Закалка в масле Отпуск	900-920 780-820 150-180	18Х2Н4МА	Цементация Закалка в масле Отпуск	900-920 850-870 180-200
12ХН2	Цементация Закалка в масле Отпуск	900-920 790-800 180-200	12Х2Н4А	Цементация Закалка в масле Отпуск	900-920 750-870 180-200
12ХН3А	Цементация Закалка в масле Отпуск	900-920 790-800 180-200	20Х2Н4А	Цементация Закалка в масле Отпуск	920-930 780-800 150-160

При *изотермической закалке* (см. рис. 4) детали нагревают на 10-20 °С выше обычной температуры закалки, охлаждают в масле, в расплавленных солях или щелочах, имеющих температуру выше мартенситной точки $M_н$ с выдержкой, достаточной для полного распада аустенита. В результате изотермической закалки уменьшаются напряжения и деформация, т.е. резко снижаются трещинообразование и коробление. Такую закалку применяют при изготовлении деталей сложной формы, больших размеров или большой длины.

Режимы изотермической закалки конструкционной стали некоторых марок приведены в табл. 8.

При *ступенчатой закалке* охлаждение от высокой температуры ведут в горячей среде (ванне) при температуре выше точки *Мн* до выравнивания температуры по всему сечению. Дальнейшее охлаждение проходит на воздухе. При этом происходит превращение аустенита в мартенсит. Ступенчатую закалку проводят двумя способами:

1-й способ – нагретое изделие охлаждают в горячей среде, температура которой на 20-30 °С выше температуры мартенситного превращения, а затем охлаждают на воздухе; после извлечения из горячей среды в период аустенитных превращений изделие можно править;

2-й способ – нагретое изделие охлаждают в горячей среде ниже температуры мартенситного превращения примерно на 160-190 °С, а затем – на воздухе; при этом способе закалки править изделия невозможно из-за быстрого образования мартенсита, но по сравнению с обычной закалкой процент брака из-за образования трещин и коробления снижается.

На рис. 4 приведены кривые охлаждения, характеризующие различные способы термической обработки стали; режимы ступенчатой закалки инструментальных сталей некоторых марок даны в табл. 9.

Закалка с подстуживанием состоит в том, что перед погружением в охлаждающую среду изделие выдерживают на воздухе. Время выдержки устанавливают опытным путем с таким расчетом, чтобы превращение аустенита не началось до погружения изделия в охлаждающую среду.

Во время *закалки в двух жидких средах* происходит быстрое охлаждение стали до температуры, которая выше мартенситной точки, и замедленное охлаждение – при температуре ниже этой точки. Этого достигают при погружении изделия в воду и последующем переносе его в масло (закалка "через воду в масло"). Время охлаждения в воде устанавливают для каждого вида деталей опытным путем.

Закалку с ограниченным пребыванием в охлаждающей среде и дальнейшим охлаждением на воздухе проводят с таким расчетом, чтобы температура изделия при извлечении его из охлаждающей ванны была ниже мартенситной точки.

Закалку с самоотпуском применяют в основном для ударного инструмента, изготовленного из углеродистой стали, твердость которого должна уменьшаться от рабочей части к хвостовику. Пребывание инструмента в охлаждающей среде ограничивают настолько, чтобы внутренняя часть сечения сохранила количество теплоты, достаточное для отпуска наружных закалившихся слоев стали после извлечения инструмента из охлаждающей среды на воздух. На практике часто инструмент вторично погружают в охлаждающую среду, чтобы не допустить излишнего нагрева поверхности. При этом для оценки режима термического процесса руководствуются цветами побежалости (например, при закалке зубил) или временем, установленным опытным путем для каждого типоразмера инструмента.

8. Режимы изотермической закалки некоторых конструкционных сталей

Сталь	Максимальная толщина или диаметр изделия, мм	Температура, °С		Выдержка в ванне, мин
		Нагрева	Среды закалочной ванны	
25ХГН2ТА	15 (изделия типа труб и пластин)	870-880	200-260	30-40
40Х2Н2МА	30 (цилиндрические изделия)		315-325	20-30
38Х2Н2МА	25 (изделия типа труб и пластин), 30 (цилиндрические изделия)		300-325	30-40
30ХГСН2А	80-100	890-910	280-320 270-300 240-280	60

9. Режимы ступенчатой закалки инструментальных сталей

Сталь	Температура, °С		Твердость HRC
	Закалки	Изотермической выдержки в соляной ванне	
У7А	800-820	150-180	59-61
У8А, У9А	780-790		60-62
У10А, У12А	790-810		61-62
У13А	810-830		62-64
11ХФ	810-830		62-63
9ХС	870-880	160-200	62-64
ХВСГ	860-875		62-63
ХГС	860-870	160-180	61-63
ХВГ	830-850	160-200	
Х	845-855	160-180	61-64
6ХС	860-875	250-300	45-50
Р9	1280-1300	400-500 (250-350)	60-61
Р18	1240-1250	400-500 (250-350)	

Примечание. В скобках указана температура второй выдержки.

Закалку с самоотпуском проводят в такой последовательности: нагревают инструмент до температуры закалки, опускают рабочую часть в воду до потемнения, вынимают инструмент, быстро зачищают рабочую часть шлифовальной шкуркой или напильником. При появлении цвета побежалости, соответствующего заданной температуре отпуска, инструмент охлаждают в масле или воде.

При *сквозной закалке* изделие прокаливают насквозь. Оно имеет практически однородную структуру (мартенсит и остаточный аустенит) и одинаковые свойства по сечению. При *несквозной закалке* сечение имеет неоднородную структуру (неравномерное распределение продуктов распада аустенита при температуре, располагающейся на диаграмме выше точки $M_н$) и разные свойства.

Обычная закалка характеризуется наличием оксидов на поверхности.

Чистая закалка проводится при нагреве в печах с контролируемой атмосферой. При этом на поверхности изделий могут образоваться пригары масла или цвета побежалости.

Преимущество *светлой закалки* с охлаждением нагретой стали в расплавленных щелочах заключается в том, что деталь, прошедшая такой вид термообработки, имеет светлую поверхность, меньшее коробление и более высокую твердость.

Состав охлаждающей ванны выбирают в зависимости от требуемой рабочей температуры. Для закалки инструментальных сталей наиболее целесообразно применять смесь из 75% едкого калия и 25% едкого натра. Щелочь расплавляют в тигле из углеродистой стали. Коррозионно-стойкую сталь для тиглей применять не рекомендуется. Закаливающая способность ванны, работающей при температуре до 250 °С, повышается при перемешивании и зависит от количества введенной воды. Наибольшей охлаждающей способностью обладает смесь, содержащая 6-10% воды.

При светлой закалке в расплавленной щелочи выполняют такие операции: подогрев в расплавленной поваренной соли при температуре 800-840 °С; нагрев под закалку в ванне при температуре, превышающей на 10-20 °С соответствующую температуру закалки (ванны, имеющие в составе хлористый барий, для светлой закалки применять нельзя, так как последний загрязняет щелочную ванну, целесообразнее использовать хлористый кальций); охлаждение в расплавленной щелочи до полного выравнивания температуры при ступенчатой закалке и до окончания превращения – при изотермической (время выдержки в щелочной ванне при ступенчатой закалке принимают равным 15 с на 1 мм сечения); промывка в воде, имеющей температуру 70-90 °С; промывка в проточной воде; окунание в 2-5%-ный водный раствор нитрита натрия, предохраняющего от коррозии.

Детали с твердостью 60 $HRC_э$ и выше не следует после закалки в щелочной ванне сразу промывать в горячей воде, так как это может привести к растрескиванию и значительному короблению. В этом случае детали необходимо охлаждать примерно до 100 °С на воздухе, а затем промывать в горячей воде. Детали, подвергаемые светлой закалке, не должны иметь следов жира во избежание появления в этих местах темных пятен.

В результате такого метода термообработки можно повысить качество детали благодаря минимальной деформации, снизить трудоемкость процесса и сократить время на термообработку.

Закалку с последующей обработкой холодом применяют для более полного разложения аустенита. При этом закаленную деталь дополнительно охлаждают ниже 0 °С.

Закалку с обработкой холодом выполняют в такой последовательности: нагрев до температуры закалки, закалка, дополнительное охлаждение до температур ниже О °С, отпуск.

Особенности закалки инструментов. Определяя необходимость разложения остаточного аустенита, нужно учитывать, что при наличии в структуре стали более 25% остаточного аустенита твердость стали заметно снижается, а износостойкость возрастает. Положительное влияние на износостойкость оказывают мелкозернистая структура, наличие остаточного аустенита и отсутствие нерастворенных карбидов. Для обеспечения высокой абразивной износостойкости хрупкая и твердая структуры не должны иметь карбидов: в мягкой и пластичной структуре должны содержаться высокодисперсные карбиды, распределенные по всей матрице.

Достаточно широко применяют быстрорежущие стали с 1,05-1,15% С. Эти стали подвергают аустенизации при температуре 1190-1210 °С и отпуску при 540-570 °С (67-70 $HRC_э$). Второй отпуск проводят при температуре на 30 °С ниже, чем первый. Перед аустенизацией эффективен нагрев с выдержкой при 950 °С в

течение 30 мин. Для повышения качества быстрорежущей стали карбиды в ее структуре должны быть дисперсными и равномерно распределенными. Температура нагрева должна точно регулироваться на всех стадиях термической обработки.

Закалка кобальтовых сталей типа Р9К5, Р9К10, Р12К8Ф2М3, Р6К8Ф2М5 с температур, более близких к верхнему пределу оптимальной температуры, и выдержка при нагреве под закалку не менее 8 с/мм сечения обеспечивают высокие режущие свойства инструментов, например, резцов и фрез. Инструменты, закаленные с пониженных температур (на 15-20 °С ниже оптимальной температуры), имеют низкие режущие свойства. Уменьшение времени выдержки при оптимальной температуре до 4 с на 1 мм сечения приводит к резкому снижению вторичной твердости и стойкости инструмента.

Нагрев сталей под закалку. Температуру нагрева под закалку выбирают в зависимости от формы, размеров, назначения и условий нагружения детали. Температура нагрева зависит от состава стали, а также от положения критических точек Ac_1 и Ac_3 на диаграмме интервалов за-калочных температур железоуглеродистых сплавов.

Нагрев под закалку проводят преимущественно в электропечах-ваннах в расплавах солей. Реже применяют печи сопротивления, газовые печи или установки ТВЧ. Данные для выбора параметров процессов термической обработки стальных изделий и составы соляных ванн для нагрева сталей приведены в табл. 10-12.

Для безопасной работы соляных ванн (устранения разбрызгивания расплавленных солей при загрузке влажных или холодных деталей) применяют ступенчатый нагрев под закалку. Инструмент из углеродистой и легированной стали подогревают один раз для подсушивания и сокращения времени окончательного нагрева; инструмент из быстрорежущей стали подогревают дважды: первый раз – для подсушивания инструмента, второй – для предотвращения его деформации в процессе закалки.

Для крупногабаритного сложнофасонного инструмента применяют третий подогрев (при температуре 1050 °С), после которого сокращается продолжительность окончательного нагрева при закалке, а следовательно, уменьшается обезуглероживание.

Первый подогрев при закалке сталей Р12, Р18, Р18Ф2, Р18К5Ф2, Р14Ф4, Р10К5Ф5, Р9К5, Р9К10, Р6М3, У7, У7А, У8, У8А, У10, У10А, У12, У12А, Х12М, ХВГ, 9ХС проводят до температуры 400-500 °С, второй подогрев при закалке сталей Р12, Р18, Р18Ф2, Р14Ф2, Р10К5Ф5, Р9К5, Р9К10, Р6М5 – до 840-860 °С, а сталей Х12Ф1, Х12М – до 800-820 °С.

Данные для расчета времени нагрева инструмента под закалку приведены в табл. 13-17, время прогрева заготовок в пламенной печи – табл. 18.

Повышение стабильности режущих свойств и износостойкости инструмента, изготовленного из вольфрамомолибденовых сталей типа Р6М5, достигается при использовании следующего способа термической обработки [а. с. 628178 (СССР)]. Инструмент подвергают дополнительному высокотемпературному подогреву и последующему подстуживанию перед окончательной термообработкой. Сначала инструмент подогревают 1-2 раза при температурах ниже температуры окончательного нагрева, затем подогревают в соляной ванне при температуре на 40-50 °С выше оптимальной температуры закалки, выдерживают при этой температуре 10-60 с (в зависимости от диаметра или толщины инструмента), переносят в соляную ванну с температурой 850-1050 °С, охлаждают в ней около 2 мин и после этого подвергают закалке и отпуску.

10. Влияние частоты электрического тока на прокаливаемость стали

Рекомендуемая частота электрического тока для нагрева под закалку на заданную глубину

Частота тока	Частота тока (Гц) при глубине закаливания, мм						
	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	6,0	10,0
Наивысшая	250000	100000	60000	30000	15000	8000	2500
Наинизшая	15000	7000	4000	1500	1000	500	150
Оптимальная	60000	25000	15000	7000	4000	1500	500

Глубина проникновения электрического тока в сталь в зависимости от частоты тока

Частота тока, Гц	Глубина (мм) проникновения тока при температуре, °С	
	15	800
50	10,0 – 5,0	70,8
500	3,0 – 1,5	22,0
2 500	1,5 – 0,7	10,0
10 000	0,70 – 0,35	5,0
50 000	0,30 – 0,15	2,2
250 000	0,15 – 0,07	1,0

11. Температура нагрева ТВЧ некоторых предварительно отожженных, нормализованных и улучшенных сталей в зависимости от времени аустенизации

Сталь	Температура нагрева (°С) при суммарном времени аустенизации, с		
	10	3	1
35	880-900 860-880 840-860	900-940 880-920 860-900	940-980 920-960 900-940
40	860-880 840-860 820-840	880-920 860-900 840-880	920-960 900-940 880-920
45, 50	850-870 830-850 810-830	870-910 850-890 830-870	910-950 890-930 870-910
45Г2, 50Г	840-860 820-840 800-820	860-900 830-870 810-850	880-920 860-900 840-880
65Г	820-840 800-820 790-820	840-880 810-850 790-830	860-900 850-890 830-870
40Х, 45Х	880-920	920-960	940-980
40ХНМ	840-880	860-900	880-920
40ХН, 45ХН	860-880 820-840	900-940 840-880	920-960 860-900
ШХ15, ШХ12 9Х	890-930 850-870	920-960 880-920	940-980 900-940
ШХ6, ШХ9	880-920 840-860	900-940 860-900	920-960 880-920
У8, У9,У10, У11, У12	780-800 760-780	820-860 800-840	840-880 820-860
ХВГ	860-880 820-840	840-880 820-860	860-900 840-880

12. Составы соляных ванн для нагрева сталей

Назначение	Содержание, % (мас. доля)						$t_{пл}$, °С	$t_{раб}$, °С
	$BaCl_2$	$MgBF_4$	NaCl	KCl	K_2CO_3	$CaCl_2$		
Предварительный нагрев быстрорежущей и высоколегированной сталей	78	-	22	-	-	-	635	700-950
	65	-	35	-	-	-	670	730-930
	50	-	-	50	-	-	640	680-870
	80	-	-	20	-	-	640	680-1060
Окончательный нагрев под закалку быстрорежущей и высоколегированной сталей	100	-	-	-	-	-	-	1020-1320
	96	-	4	-	-	-	-	1000-1310
	95	-	5	-	-	-	-	
	90	-	10	-	-	-	-	950-1300
Окончательный нагрев под закалку углеродистой и легированной сталей	-	-	100	-	-	-	800	850-920
	-	-	-	100	-	-	776	820-920
	-	-	44	56	-	-	655	700-900
	22	-	37	41	-	-	552	500-800
	5	-	25	70	-	-	500	540-870
	-	-	50	-	-	50	620	720-900
Отжиг и нормализация	50	-	50	-	-	-	700	750-920
	75	-	25	-	-	-	704	760-925
	53	-	20	27	-	-	550	680-1150

Примечание. $t_{пл}$, $t_{раб}$ – температуры соответственно плавления состава и рабочая расплава солей.

13. Отношение продолжительностей предварительного подогрева и окончательного нагрева стали под закалку

Сталь	Первый подогрев		Второй подогрев	
	Температура, °С	Отношение	Температура, °С	Отношение
Углеродистая и легированная	400-500	1 : 1	-	-
Высокохромистая и быстрорежущая	400-500	2 : 1	840-880	2 : 1
Быстрорежущая	400-500	2 : 1	1040-1060	1 : 1

14. Зависимость времени нагрева в различных средах от температуры среды и отношения объема заготовки V (см^3) к площади ее поверхности F, см^2

Среда	Температура, °С	Отношение	Время нагрева, мин
Расплав поваренной соли	850	0,50	4
		1,00	15
		1,50	32
	950	0,50	3
		1,00	11
		1,50	22
	1050	0,50	2
		1,00	7
		1,50	14

Продолжение табл. 14

Среда	Температура, °С	Отношение	Время нагрева, мин
Масло	100	0,50 1,00 1,50	14 23 32
	200	0,50 1,00 1,50	11 18 24
	300	0,50 1,00 1,50	8 14 19
Расплав солей $NaNO_3$ и KNO_3 (содержание 1 : 1)	300	0,50 1,00 1,50	3,5 8 14
	450	0,50 1,00 1,50	2,5 6 10
	600	0,50 1,00 1,50	1,4 4 7
Расплав свинца	650-850	0,25 0,50 1,00 1,50 2,00 2,50	0,6-0,8 1,2-1,6 3-4 5,1-6,8 7,8-11,0 11-15
Атмосфера электрической печи	500	0,12 0,08	25 45
	750	0,12 0,08	20 26
	900	0,12 0,08	15 22

15. Продолжительность τ (мин) подогрева и окончательного нагрева инструментов и технологической оснастки под закалку

Инструмент	Подогрев до температуры, °С		Окончательный нагрев под закалку
	550-600	800-850	
Метчики, развертки, сверла, круглые протяжки и другой стержневой инструмент	$\tau = bD$	$\tau = cD$	$\tau = aD$
Фрезы, насадные развертки и зенкеры при 0,5 (D - d) < h Круглые, а также накатные плашки и фрезы при 0,5 (D - d) < h	$\tau = b\dfrac{D-d}{2}$	$\tau = c\dfrac{D-d}{2}$	$\tau = a\dfrac{D-d}{2}$
Круглые протяжки из легированных сталей, нагреваемые в электрической печи	$\tau = b(d+4)$	-	$\tau = d+4$

Продолжение табл. 15

Инструмент	Подогрев до температуры, °С		Окончательный нагрев под закалку
	550-600	800-850	
Шпоночные протяжки	$\tau = b\,(h+4)$	-	$\tau = h + 4$
Молотковые штампы и штампы для *холодного деформирования* стали	$\tau = b\,h$	$\tau = c\,h$	$\tau = a\,h$

Обозначения: D – диаметр режущей части инструмента, мм; d – диаметр отверстия инструмента, мм; h – высота и толщина, мм; a, b, c – коэффициенты (см. табл. 16).

16. Значения коэффициентов *a*, *b*, *c* (мм/мин) для расчета продолжительности нагрева инструмента под закалку

Материал	*Коэффициент*	Соляная ванна	Печь периодического действия
Углеродистая сталь	*a*	0,10-0,17 0,30-0,35 (без подогрева)	0,7-0,8 1,2-1,5 (без подогрева)
	b	0,30-0,40	1,4-2,5
Легированная сталь	*a*	0,15-0,20	1,0-1,2
	b	0,30-0,40	1,4-2,5
Высоколегированная сталь типа Х12, Х12М	*a*	0,17-0,18	0,4-0,5
	b	0,30-0,40	1,4-2,5
	c	0,30-0,35	0,8-1,1
Быстрорежущая сталь типа Р18 и Р9	*a*	0,9-0,12	0,25-0,35

Примечание. Если ванна не соляная, а свинцовая, то для углеродистой стали коэффициент $a = 0{,}1$ (без подогрева).

17. Продолжительность (мин) нагрева и выдержки при закалке в зависимости от сечения заготовки из углеродистой стали

Размер прогреваемого сечения, мм	Пламенная печь		Соляная ванна		Размер прогреваемого сечения, мм	Пламенная печь		Соляная ванна	
	Нагрев	Выдержка	Нагрев	Выдержка		Нагрев	Выдержка	Нагрев	Выдержка
25	20	5	7	3	12	100	25	40	20
50	40	10	17	8	150	120	30	50	25
75	60	15	24	12	175	140	35	55	30
100	80	20	33	17	200	160	40	65	35

Примечания: 1. Для легированной стали продолжительность нагрева и выдержки должна быть увеличена на 25-40%.

2. Температура печи должна быть на 10-30 °С выше заданной температуры закалки.

18. Продолжительность (мин) подогрева цилиндрических и квадратных заготовок в пламенной печи

Температура печи и заготовки, °С	Диаметр цилиндра (сторона квадрата), мм							
	25	50	75	100	150	200	250	300
300	20/-	37/-	62/-	-/-	-	-	-	-
500	14/-	32/-	47/-	-/-	-/-	-	-	-
650	13/-	31/-	47/-	-/-	-	-	-	-
750	11/14	21/35	47/50	70/70	200	250	350	400
900	9/13	25/25	32/42	70/70	120	160	200	250
1000	-/-	25/-	35/-	60/-	90	120	180	200
1100	7/11	23/25	31/32	40/40	80	110	160	180
1200	-/-	20/-	30/-	40/-	70	100	120	150

Примечания: 1. В числителе дроби продолжительность операции для цилиндрической заготовки, в знаменателе – для квадратной.
2. Заготовки с размерами 150-300 мм – цилиндрические.

Время выдержки при первом нагреве для различных диаметров (толщине) инструмента:

Диаметр, мм	1-10	20-40	50-100
Время выдержки, с	10-30	35-45	50-60

Такая термическая обработка приводит к гомогенизации аустенита, равномерной по величине зерна структуре и стабильным механическим и эксплуатационным свойствам инструмента.

Износостойкость инструмента при точении и фрезеровании труднообрабатываемых материалов повышается на 25-30%.

Для предупреждения окисления и обезуглероживания, а также для уменьшения коробления и трещинообразования нагрев и охлаждение технологической оснастки, в том числе инструментов из углеродистой стали, проводят в соляных ваннах (исключение составляют отдельные виды специального инструмента; например, длинные протяжки, для которых нет стандартных электрических ванн необходимого размера). Во избежание обезуглероживания поверхности в процессе нагрева необходимо проверять химический состав солей, не применять соли, имеющие отклонения по составу от предлагаемого стандартом или ТУ, и периодически добавлять в ванну раскислители (буру, борную кислоту, фтористый магний).

Охлаждение при закаливании сталей. Выбор среды для охлаждения зависит от марки стали, требуемой твердости формы и размеров детали. По составу и свойствам все закалочные среды подразделяют на четыре группы: вода и водные растворы, масла, расплавленные соли и щелочи, воздух. Скорость охлаждения стали в различных средах приведена в табл. 19. Воду и водные растворы применяют при закалке деталей простой формы диаметром или толщиной 8-12 мм из углеродистой стали. Температуру воды необходимо поддерживать примерно 18-25°С. При температуре ниже 18 °С увеличивается скорость структурных превращений, что ведет к трещинообразованию. В случае повышения температуры воды свыше 25 °С и загрязнения ее маслами и мылом резко снижается охлаждающая способность в интервале температур 550-650 °С, что приводит к образованию мелких пятен на поверхности закаленного инструмента. Детали сложной конфигурации из углеродистой стали охлаждают в двух средах: в воде до 250-300 °С, а затем в масле. Продолжительность выдержки в воде до перенесения в масло составляет 1-2 с на каждые 6 мм диаметра или толщины изделия. Переносить деталь из воды в мас-

19. Скорость охлаждения стали в различных закаливающих средах

Закаливающая среда	Скорость охлаждения (°С/с) при температуре, °С	
	650-550	300-200
Вода при температуре, °С:		
18	600	270
25	500	270
50	100	270
75	30	200
Мыльная вода	30	200
Эмульсия масла в воде	70	200
Вода, насыщенная углекислотой	150	200
10%-ный водный раствор при 18 °С:		
едкого натра	1200	300
поваренной соли	1100	300
соды	800	270
5%-ный раствор марганцевокислого калия	450	100
Керосин	160-180	40-60
Индустриальное масло	120	25
Спокойный воздух	3	1
Сжатый воздух	30	10

ло следует быстро во избежание отпуска. Масла имеют более низкую скорость охлаждения, чем вода. Охлаждение в масле проводят в интервале температур от 18 °С до температуры, которая на 40-50°С ниже температуры вспышки масла.

Для сталей с устойчивым аустенитом (Р18, Р9, Х12М, Х12Ф1) охлаждающей средой служит воздух, подаваемый компрессором или вентилятором, либо спокойный воздух. При охлаждении воздухом, подаваемым компрессором или вентилятором, перед закалкой проверяют, нет ли в воздухопроводе воды, так как попадание ее на изделие может быть причиной появления трещин. Поэтому на выходе воздухопровода устанавливают осушитель воздуха (химический с адсорбентом, электрический с тепло-электронагревателями – ТЭНами; тепловой – пароперегреватель) или устраивают сифонное колено.

Критические диаметры заготовок из некоторых марок инструментальных сталей при закалке в различных средах приведены в табл. 20; назначение и рекомендуемые составы соляных ванн – в табл. 21.

Нагрев можно выполнять **в псевдоожиженном слое.** Для этого на под печи укладывают трубчатый змеевик для подачи газовоздушной смеси. Печь оборудуют вытяжной системой вентиляции. Под печи заполняют частицами корунда размером 0,3-0,4 мм так, чтобы на поверхности змеевика образовался слой толщиной, равной 1,5-2 толщинам одного ряда обрабатываемых заготовок. Частицы во время работы находятся во взвешенном состоянии в газовоздушной смеси. Смесь сжигают с коэффициентом избытка воздуха 0,6-1,2. Высота плотного слоя обычно составляет 60-250 мм. Нагреваемые твердые частицы корунда, "бомбардируя" поверхность нагреваемого металла, ускоряют нагрев (скорость нагрева достигает 15 мм/мин). Коэффициент теплоотдачи составляет 550-600 Вт/(м^2.с). В процессе

20. Критический диаметр заготовок из инструментальных сталей при закалке в различных средах

Сталь	Критический диаметр (мм) при закалке			
	в воде	в масле	в селитре	на воздухе
У7, У7У, У8, У8А У10, У10А У11, У11А	15-20	4-6	4-6	*Не закаливаются*
У12, У12А У13, У13А	10-12 10-20			
11ХФ	15-25	7-10	4-10	Не закаливается при диаметре инструмента более 20 мм
Х, ШХ15	—	8-35	8-27	Не закаливаются
ХВСГ Х6ВФ	—	80 80-100	80 80-100	25-30
Р9	—	—	—	До 10

Сталь	Критический диаметр (мм) при закалке			
	в воде	в масле	в селитре	на воздухе
Х12М	Сплошная прокаливаемость	80-100	80-100	50-60
Х12Ф1		80-100	80-100	50-60
9ХС		15-50	12-35	Не закаливаются
ХВГ		15-70	15-40	
Р18		сплошная прокаливаемость		10-15

Примечание. Критический диаметр соответствует твердости 60 $HRC_э$ в глубине образца и твердости 62 $HRC_э$ и более на его поверхности.

нагрева поверхностные слои металла выгорают. Угар металла в псевдоожиженном слое составляет 0,2-0,25%, а при нагреве в электропечах 1,0-1,7%.

Высокое качество термической обработки обеспечивается **при нагреве заготовок из инструментальных сталей в вакууме.** Так, нагрев в вакууме при давлении 10 Па и менее практически исключает окисление, науглероживание и обезуглероживание поверхности стальных заготовок, благодаря чему этот способ нагрева особенно предпочтителен при технической обработке сталей, легированных хромом, титаном, цирконием, алюминием и марганцем.

Разработаны специальные установки, которые наряду с отжигом в вакууме дают возможность проводить при необходимости цементацию с последующей закалкой в различных средах. В современных вакуумных печах, работающих при температурах до 3000 °С, можно проводить термическую обработку различного инструмента из углеродистых, легированных и быстрорежущих сталей с высокой экономической эффективностью. Для закалки инструмента в жидких средах применяют многокамерные вакуумные печи шлюзового типа.

Преимущества термической обработки в вакууме инструментальных сталей: чистая поверхность, сниженное содержание газов, хорошая воспроизводимость результатов, меньшее коробление, повышенная стойкость инструмента.

Инструментальные стали подвергают термической обработке в вакууме 0,13-66,5 Па. При термической обработке в вакууме возможно испарение леги-

21. Рекомендуемые составы ванн для термообработки инструмента

Выполняемая операции	Температурный интервал ванн, °С	Соляные ванны, % (мас. доля)						$t_{пл}$, °С
		BCl_2	MgF_2	NaCl	$NaNO_2$	NaOH	KNO_3	
Быстрорежущие стали								
Второй подогрев под закалку	840 – 860	68	2	30	-	-	-	650
	840 – 860	78	-	22	-	-	-	654
	1040 – 1060	97	3	-	-	-	-	950
	1040 – 1060	100	-	-	-	-	-	960
Окончательный подогрев под закалку	1200 – 1300	95	5	-	-	-	-	940
	1200 – 1300	100	-	-	-	-	-	960
Нагрев под светлую закалку	150 – 250	-	-	-	-	25	-	140
Охлаждение при ступенчатой закалке	180 – 240	-	-	-	50	-	50	145
Отпуск	150 – 300	-	-	-	45	-	55	137
Высокохромистые инструментальные стали								
Второй подогрев под закалку	840 – 860	68	2	30	-	-	-	650
	840 – 860	78	-	22	-	-	-	654
Окончательный нагрев под закалку	980 – 1050	68	2	30	-	-	-	650
	980 – 1050	78	-	22	-	-	-	654
Охлаждение при ступенчатой закалке	360 – 600	-	-	-	-	-	100	335
	350 – 700	-	-	-	-	100	-	322
Отпуск	400 – 560	-	-	-	-	-	100	335
	400 – 560	-	-	-	-	15	85	226
	400 – 560	-	-	-	-	100	-	328
Углеродистые и легированные инструментальные стали								
Нагрев под закалку	770 – 900	68	2	30	-	-	-	650
	770 – 900	78	-	22	-	-	-	654
	790 – 900	-	-	70	-	-	-	730
	700 – 900	-	44	-	-	56	-	655

Щелочные ванны для охлаждения сталей

Выполняемые операции	Содержание, % (мас. доля)					Температура, °С	
	KOH	NaOH	KCl	K_2CO_2	NaCl	$t_{пл}$	$t_{раб}$
Светлая закалка быстрорежущей и высоколегированной сталей	-	100	-	-	-	318	350-400
	75	25	-	-	-	140	150-250
	65	35	-	-	-	155	180-350
	100	-	-	-	-	360	400-650
	-	85	15	-	-	296	330-600
	-	62	-	38	-	238	290-600
Светлый отпуск	63	37	-	-	-	159	130-350
	-	60	-	-	40	450	550-700

Составы для безщелочных ванн при нагреве и охлаждении металлов

Выполняемые операции	Содержание, % (мас. доля)					Температура, °С	
	KNO_3	$NaNO_2$	$NaNO_3$	NaCl	NaOH	$t_{пл}$	$t_{раб}$
Ступенчатая и изотермическая закалка углеродистой и легированной сталей	80	-	20	-	-	145	180-240
	20	-	80	-	-	230	260-550
	50	45	5	-	-	140	145-590
	-	100	-	-	-	317	325-600
	55	-	45	-	-	220	260-480
	-	45	45	-	-	221	250-550
Ступенчатая закалка быстрорежущих и высоколегированных сталей	100	-	-	-	-	335	360-600
	-	95	5	-	-	304	380-520

Продолжение таблицы 21

Выполненные операции	Содержание, % (мас. доля)					Температура, °С	
	KNO_3	$NaNO_2$	$NaNO_3$	NaCl	NaOH	$t_{пл}$	$t_{раб}$
Отпуск закаленных сталей	-	100	-	-	-	271	300-350
	40	60	-	-	-	172	220-550
	30	65	-	5	-	-	290-550
Изотермическая закалка и отпуск сталей, совмещенных с оксидированием поверхности	-	20	-	-	80	250	280-550
	-	10	15	-	75	250	280-600
	-	15	25	-	60	280	300-500
	-	25	30	-	45	280	300-500
Отжиг алюминиевых сплавов	45	-	55	-	-	218	250-590
	53	40	7	-	-	410	180-540
Нагрев под закалку алюминиевых сплавов	65	-	35	-	-	215	250-600
	33	-	67	-	-	232	260-540
	53	40	7	-	-	140	180-540

Примечания: 1. Для раскисления соляных ванн применяют буру 0,8-1% или ферросилиций 0,5-1,5% массы соли.
2. Для раскисления щелочных ванн используют желтую кровяную соль 0,2-0,5% массы щелочи.
3. В расплаве, применяемом для нагрева под закалку при 790-900 °С для углеродистых и легированных инструментальных сталей, содержится дополнительно к указанному количеству NaCl примерно 25% KCl и 5% примесей, а в расплаве для нагрева под светлую закалку при 150-250 °С, кроме 25% NaOH, содержится еще 75% KOH.
4. Обозначения: $t_{пл}$ и $t_{раб.}$ – температуры плавления и рабочая.

рующих элементов, в особенности Mo и Cr. Скорость испарения зависит от глубины вакуума. Для стали с 14% Cr при температуре 990 °С и вакууме 0,01 Па наблюдается снижение содержания Cr от 0,5 до 13,5%. Поэтому в процессе термической обработки быстрорежущей стали вакуум 0,013 Па поддерживается только при нагреве до температуры 850 °С; при температуре закалки 1220 °С в печь подводят азот при давлении 13,3-66,5 Па.

Тепловую изоляцию вакуумных печей осуществляют с помощью графитоволокнистых материалов. Необходимая скорость охлаждения при закалке достигается принудительной циркуляцией атмосферы. Снижение температуры от 1220 до 550 °С при давлении 0,15-0,175 МПа достигается за 2 мин. Для закалки быстрорежущей стали необходима большая скорость охлаждения, чем при закалке штамповой стали, поэтому давление газа должно быть большим.

Температура нагрева быстрорежущей стали при закалке в вакуумной печи должна быть на 10-20 °С ниже; 12%-ные Cr-содержащие стали с W или Mo можно также закаливать в вакуумной печи. Для ускорения отпуска в вакуумных печах детали нагревают и охлаждают в циркулирующем инертном газе. При охлаждении в поток газа автоматически вводят теплообменник. При необходимости отпуск может быть совмещен с операцией азотирования, которая проводится в смеси аммиака и эндогаза (50 : 50); при этом образуется слой карбонитридов в несколько микрон, обладающий высокой износостойкостью, под которым лежит диффузионный слой толщиной 100-200 мкм, обогащенный азотом.

Отпуск и старение закаленных сталей

Отпуск закаленных сталей – процесс нагрева и выдержки закаленной стали при температуре на 20-30 °С ниже критической Ac_1. Во время отпуска происходит превращение мартенсита и остаточного аустенита, в результате чего уменьшаются внутренние напряжения и хрупкость, повышаются вязкость и пластичность стали.

Отпуску необходимо подвергать все закаленные детали, кроме тех, которые прошли изотермическую закалку. В зависимости от требуемых температур отпуск проводят в масляных или селитровых ваннах, в печах с принудительной циркуляцией воздуха, а также в ваннах с расплавленной щелочью (светлый отпуск).

Отпуск технологической оснастки из углеродистой и легированной сталей следует проводить преимущественно в жидких средах, желательно в расплавленных солях. Для обеспечения качественного отпуска крупногабаритного инструмента сложной формы (фрезы, долбяки, шеверы и т. п.) более рационально проводить замедленный нагрев в печах с перемешиваемой атмосферой или в атмосфере пара.

Режимы отпуска инструментальных сталей (с. 47-51) определяются их химическим составом и требуемой твердостью. Охлаждение после отпуска может быть медленным, если сталь не склонна к отпускной хрупкости. В противном случае охлаждение ведут быстро.

По условиям нагрева различают отпуск высокий, низкий, средний и многократный. При *высоком отпуске,* когда температура нагрева достаточно высока, сталь приобретает сорбитовую структуру. Для конструкционной стали температура сорбитизации равна 450-670 °С. В процессе высокого отпуска закаленную сталь, охлажденную до температуры ниже 300 °С, не следует помещать в печь с высокой температурой, так как быстрый нагрев может привести к растрескиванию. При *низком отпуске* температура нагрева ограничена необходимостью сохранения высокой твердости. Высокохромистые, инструментальные и быстрорежущие стали нагревают до 400-600 °С. *Средний отпуск* применяют при необходимости сохранить упругие свойства в сочетании с достаточной вязкостью и проводят при температуре нагрева 350-480 °С.

При *многократном отпуске* процесс нагрева, выдержки и охлаждения повторяют несколько раз. Такой отпуск рекомендуется в основном для быстрорежущей стали. При проведении многократного отпуска инструмента из быстрорежущей стали необходимо охлаждение инструмента до 20 °С (после каждого отпуска) на спокойном воздухе либо струей воздуха, нагретой до 20-25 °С. Для охлаждения можно также использовать водяной туман.

Заменять продолжительный отпуск большим числом кратковременных отпусков при более высоких температурах (например, двукратный отпуск по 30 мин при 580 °С или двукратный отпуск по 15 мин при 600 °С) можно при термической обработке инструмента из сталей типа Р9 и Р18. Кратковременный отпуск при 580 °С допускается в автоматизированных агрегатах и в стационарных соляных ваннах с обязательным автоматическим регулированием температуры расплава с точностью ±5 °С и строгим выполнением технологии отпуска. Кратковременный отпуск при 600 °С допускается применять только в автоматизированных конвейерных агрегатах и линиях, где можно соблюдать малую выдержку (10-15 мин) при единичной загрузке деталей в специальные приспособления.

В случае проведения отпуска в ваннах или в печах с газовой атмосферой необходимо соблюдать следующие правила: не загружать детали на под печи, особенно если печь до загрузки работала при более высоких температурах; применять специальные корзины или поддоны, которые изолируют отпускаемые детали от прямого контакта с подом печи; при использовании жидких отпускных ванн подогревать инструмент перед его загрузкой в ванну.

Отпуск проводят также и на цвет побежалости, нагревая детали в печах, на электроплите, в горячем песке и т. п. Появляющаяся в результате нагрева оксид-

ная пленка приобретает различные цвета побежалости, зависящие от температуры отпуска. Перед отпуском на один из цветов побежалости необходимо зачистить деталь, снять окалину, нагар масла и пр. В табл. 22 приведены температуры, соответствующие цветам побежалости.

Температура отпуска зависит от состава стали и требуемой твердости. Для получения твердости не менее 59-60 $HRC_Э$ отпуск проводят при температуре 150-250 °С. Штампы из углеродистой стали для горячей штамповки, цанги и ударный инструмент отпускают при температуре 250-400 °С. При этом мартенсит превращается в троостит, твердость $HRC_Э$ снижается от 50 до 45, повышается пластичность. Штампы для горячей штамповки и детали приспособлений из легированных сталей отпускают при температуре 400-600 °С. В результате такого отпуска образуется сорбитовая структура. Твердость $HRC_Э$ снижается от 45 до 30, резко повышаются пластичность и ударная вязкость. Быстрорежущую сталь отпускают при температуре 540-580 °С. Отпуск сопровождается увеличением твердости ("вторичное отвердевание"), так как происходит выделение карбидов из аустенита, который при последующем охлаждении превращается в мартенсит. Для быстрорежущих сталей марок Р12, Р18, Р18К5Ф2 выполняют три отпуска; для Р14Ф4, Р10К5, Р9Ф5 – три-четыре отпуска; для Р9М4, Р6М3 – два отпуска.

Продолжительность отпуска приведена в табл. 23; твердость закаленной инструментальной стали в зависимости от температуры отпуска – в табл. 24.

Охлаждение после отпуска проводят на воздухе. Стали, содержащие хром и никель, после отпуска в интервале температур 450-650 °С охлаждают в масле или воде, так как при более медленном охлаждении они становятся хрупкими.

Измерительный инструмент высокой точности диаметром или толщиной 15-20 мм отпускают при 125-130 °С в течение 24-36 ч, диаметром или толщиной более 20 мм при 125-130 °С в течение 36-48 ч. Один продолжительный отпуск можно заменить несколькими кратковременными, но с суммарной продолжительностью, равной указанной выше. Двукратный отпуск измерительного инструмента проводят по следующей схеме: первый отпуск при температуре 135-140 °С в течение 1-2 ч; второй - при 120-125 °С в течение 1-2 ч. Вторичный отпуск инструмента при 120-130 °С в течение 2-3 ч применяют для снятия напряжений, вызванных шлифованием.

Инструмент, который должен иметь высокую твердость (58-60 HRC), отпускают при 150-200 °С. В этом случае твердость снижается незначительно. Отпуск при более низких температурах (120-160 °С) применяют для измерительно-

22. Температуры, соответствующие цветам побежалости металлической поверхности

Цвет побежалости	Температура, °С	Толщина окисленного слоя, мкм
Светло-желтый	220	0,45
Соломенно-желтый	240	0,45
Желто-коричневый	255	0,50
Красно-коричневый	265	0,50
Фиолетовый	280	0,65
Синий	300	0,65
Голубой	315	0,72
Серый	300-350	0,72

23. Ориентировочная продолжительность отпуска инструментальной стали в электрических печах с принудительной циркуляцией воздуха

Наибольший размер сечения технологической оснастки, мм	Температура, °С	Продолжительность выдержки (мин) для сечения		
		Круглого	Квадратного	Прямоугольного
25	200-400	110-120	130-140	160-170
50	200-400	Св. 120 до 130	150-160	180-190
100	200-400	140-150	180-190	210-220
100	180-200	150	180	210

Примечание. При отпуске в соляных или масляных ваннах продолжительность выдержки пересчитывают с учетом коэффициента, равного 0,4.

го инструмента для снятия напряжений после чернового шлифования. Такой отпуск рекомендуется проводить в нагревательной масляной ванне (старение).

Дополнительный отпуск после заточки и шлифования инструмента из быстрорежущей стали проводят для повышения его износостойкости. Режим дополнительного отпуска: температура нагрева 360-370 °С, время выдержки 2 ч, охлаждение на воздухе. Отпуск проводят в отпускной печи. Стойкость инструмента при этом повышается максимально в 1,5 раза.

Улучшение – процесс, состоящий из закалки и последующего высокого отпуска при 500-700 °С. Улучшению подвергают стали для получения необходимого сочетания прочности и вязкости. Улучшение углеродистой и легированной сталей проводят до закалки и отпуска, а быстрорежущей стали и ее заменителей – после термической обработки режущей части инструмента.

Улучшение легированных сталей выполняют в такой последовательности: закалка в масле (после предварительной механической обработки) от температуры 1290 °С для сталей типа Р18 и от 1250 °С для сталей типа Р9; нормализация с нагревом до 840-860 °С; закалка при 920-950 °С; отпуск при 670-720 °С с выдержкой 2-3 ч до получения твердости 33-37 HRC и для достижения хорошей обрабатываемости при чистовой обработке резанием; закалка осуществляется по обычным режимам (табл. 25).

Для улучшения структуры и уменьшения деформации при последующей термической обработке применяют комбинированную термическую обработку – закалку в масле с последующим отжигом. Температуру нагрева для комбинированной закалки принимают на 20-30 °С выше температуры, приведенной в табл. 25. Такой обработке подвергают заготовки для технологической оснастки сложной конфигурации, а также резьбовой инструмент после черновой обработки резанием.

Твердость закаленных углеродистых сталей в зависимости от температуры отпуска приведена в табл. 26.

Старение – процесс отпуска стали с метастабильной структурой при температуре 120-200 °С или при нормальной температуре. В процессе старения происходит изменение физических и механических свойств сталей, а структура принимает более стабильное состояние. По температурным условиям различают естественное, происходящее при нормальной температуре, и искусственное, осуществляемое при повышенной температуре (обычно не выше 200 °С), старение. По на-

24. Твердость закаленных легированных инструментальных сталей в зависимости от температур отпуска

Сталь	Твердость HRC при температуре отпуска, °С				
	160-200	200-300	300-400	400-500	500-600
7ХФ	60-59	59-55			
8ХФ	61-60	60-55	-	-	-
9ХФ	62-60	60-55	-	-	-
11ХФ	64-60	60-55	55-50	50-41	-
13Х	64-61	60-55	55-50	50-41	-
ХВ4	66-64	64-60	60-53	53-48	48-40
В2Ф	62-59	59-55	55-49	49-41	41 -35
9Х1, Х, ШХ15	64-61	61-55	49-55	49-41	41-28
12Х1, 9ХС, ХГС	64-63	63-59	59-54	54-47	47-39
9ХВГ	63-60	60-56	-	-	-
ХВГ	63-62	62-58	58-52	52-46	46-37
ХВСГ	64-63	63-59	59-54	54-47	47-39
9Х5ВФ	61-59	-	-	-	-
8Х6НФТ	62-58	-	-	-	-
8Х4В3М3Ф2	62-59	-	-	-	-
Х6ВФ	63-58	-	-	-	-
Х12	65-62	62-59	59-58	58-56	56-50
Х12М	63-62	62-59	59-57	57-55	55-47
Х12Ф1	63-59	59-57	57-57	-	-
7ХГ2ВМ	60-59	59-56	56-53	53-48	48-39
6Х6В3МФС	-	-	-	-	60-58
7Х3, 8Х3	-	60-58	58-55	55-50	50-39
5ХВМ	-	59-58	58-48	48-35	-
5ХНВ	-	-	-	47-41	41 -34
5ХНВС	-	-	-	-	41 -35
5ХГМ	-	57-52	52-46	46-40	40-34
4ХМФС	-	-	-	-	46-36
4Х5В2ФС	-	-	-	-	52-51
4Х5МФС	-	-	-	-	50-45
4Х5МФ1С	-	-	-	-	50-45
4Х3ВМФ	-	-	-	50-45	-
4Х4ВМФС	-	-	-	-	53-47
3Х3М3Ф	-	-	-	-	50-45
3Х2В8Ф	52-49	49-48	48-46	46-45	45-40
4Х2В5МФ	-	-	-	-	50-45
4Х2В2МФС	-	-	-	-	50-45
5Х3В3МФС	-	-	-	-	50-45
5Х2МНФ	-	-	-	-	50-45
4ХС	До 52	52-51	51-48	48-42	42-35
6ХС	-	60-55	55-52	52-42	42-36
4ХВ2С	-	53-51	51-49	49-42	42-33
5ХВ2С	54-52	52-48	48-42	42-36	-
6ХВ2	-	58-53	53-49	49-43	43-35
6ХВГ	-	55-52	52-47	47-43	43-35

25. Температура отжига, закалки и отпуска инструментальных сталей

Сталь	Температура, °С			Твердость после отпуска HRC, не более
	Отжига	Закалки	Отпуска	
У7, У7А	690-710	810-840	140-200	63
У8, У8А	690-710	800-820	140-200	63
У10, У10А	750-770	790-810	140-200	65
У12, У12А	750-770	790-810	140-200	65
У13, У13А	750-770	790-810	140-200	65
Р5К10	860-880	1220-1240	570-610	66
Р6М3	850-870	1220-1240	570-610	66
Р6М5	840-860	1225-1235	550-560	65
Р8М3К6С	870-890	1200-1230	535-565	69
Р9	830-850	1230-1250	550-570	62
Р9К5	860-880	1220-1240	570-580	66
Р9К10	840-860	1235-1245	565-575	66
Р9Ф5	840-860	1220-1240	570-580	66
Р9М4К8	840-860	1210-1240	540-560	68
Р10К5Ф5	860-880	1230-1250	570-610	67
Р12	860-880	1240-1260	560-570	65
Р12Ф2К8М3	850-860	1220-1250	540-560	68
Р14Ф4	860-880	1240-1260	560-610	66
Р18, Р18М	860-880	1270-1290	550-570	62
Р18Ф2	860-880	1270-1290	570-610	66
Р18К5Ф2	860-880	1270-1290	570-610	66
5ХВ2С	710-740	860-900	400-500	42
5ХНВ	830-850	840-860	480-580	42
5ХНМ	780-790	830-860	500-580	42
Х12М, Х12Ф1	850-870	1030-1050	140-200	64
ХВ5	800-820	830-850	140-170	67
ХВГ	770-790	830-850	140-170	65
Х, ШХ15	770-790	830-850	140-170	65
9ХС	790-810	860-880	140-200	65
11Х	750-770	800-820	140-250	65
13Х	750-770	780-800	100-200	67
ХВСГ	790-810	860-880	140-250	63
Х6ВФ	830-850	990-1010	150-210	64
55Х6В3СМФ	860-880	1060-1075	535-545	61

26. Твердость закаленных углеродистых сталей в зависимости от температуры отпуска

Сталь	Твердость HRC при температуре отпуска, °С				
	160-200	200-300	300-400	400-500	500-600
У7, У7А	63-60	60-54	54-43	43-35	35-27
У8, У8А, У8Г	64-60	60-55	55-45	45-35	35-27
У9, У9А	63-62	62-56	56-46	46-37	37-28
У10, У10А	64-62	62-56	56-47	47-38	-
У11, У11А	65-62	62-57	57-49	49-38	-
У12, У12А	62-65	62-57	57-49	49-38	-
У13, У13А	66-62	-	-	-	-

чальной структуре различают старение закаленной или наклепанной стали, проводимое для стабилизации размеров и формы детали, и старение (дисперсионное твердение) стали, имеющей в структуре пересыщенные или твердые растворы.

Применение метода неравномерной термической обработки рабочих поверхностей и его использование применительно к блокам цилиндров и втулкам ДВС

Известные технологические мероприятия и их сочетания в той или иной композиции позволяют повысить износостойкость рабочей поверхности цилиндра от нескольких процентов до нескольких раз. Однако все предлагаемые решения обеспечивают повышение износостойкости одинаково по всей поверхности трения, а условия работы деталей (цилиндра и колец) отличаются как по длине образующей цилиндра, так и по окружности, вследствие чего цилиндры подвергаются неравномерным износам. Повышенные износы в верхней части цилиндра и в плоскости качания шатуна снижают индикаторные показатели работы двигателя, приводят к увеличению расхода топлива и масла, ухудшению условий трения колец и преждевременному выходу их из строя. Установка износостойкой вставки в верхнюю зону цилиндра уменьшает в этой части пик износа цилиндра, но обеспечивается это ступенчато, не по заданному оптимальному закону изменения физико-механических свойств. Была разработана технология изготовления гильз (втулок) цилиндров автотракторных и судовых дизелей с переменной износостойкостью. Но в данном случае переменная износостойкость обеспечивается только по длине образующей, а по окружности остается одинаковой.

Анализ эпюр износа цилиндров двигателей ВАЗ всех моделей и двигателя автомобиля "Таврия" показывает неравномерность износа цилиндра как по длине образующей, так и в поперечном сечении. Аналогичные по форме эпюры износа цилиндров имеют практически все автомобильные двигатели отечественного и зарубежного производства, как карбюраторные и инжекторные, так и дизельные. Обширный статистический материал по износам цилиндров в технической литературе иллюстрирует эти же закономерности.

На рис. 5. кривая 1 показывает распределение износа по длине втулки цилиндра дизеля 8ЧН 25/34. Видно, что в верхней части втулки ее износ почти в 5 раз больше, чем в нижней части. Причем твердость втулки в исходном состоянии практически одинакова по всей длине. Повышенный же износ втулки в верхней части объясняется более тяжелыми условиями трения при наличии высоких температур, давления, коррозионно-активной среды и пр.

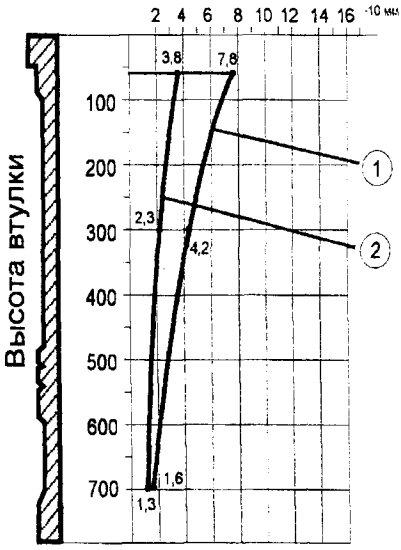


Рис. 5. Эпюры износа чугунных цилиндровых втулок дизеля 8ЧН 25/34: 1 – серийные втулки; 2 – после упрочнения

Для того, чтобы уменьшить износ чугунных втулок в зоне верхней мертвой точки нахождения поршня, была высказана идея изменения твердости рабочих поверхностей по длине и периметру втулки за счёт неравномерной термической обработки. Прежде всего, экспериментально была получена зависимость величины износа чугунных образцов и коэффициента трения от твердости. Эта зависимость представлена на рис. 6. По кривой 1 видно, что при твердости 330 НВ износ образцов составляет 0,5 мг, а при 220 НВ он выше – 2,0 мг, т.е. в 4 раза больше. Коэффициент трения в крайних точках по кривой 2 на рис. 5 также уменьшается с ростом твёрдости чугуна. Сравним величины 0,23 и 0,19.

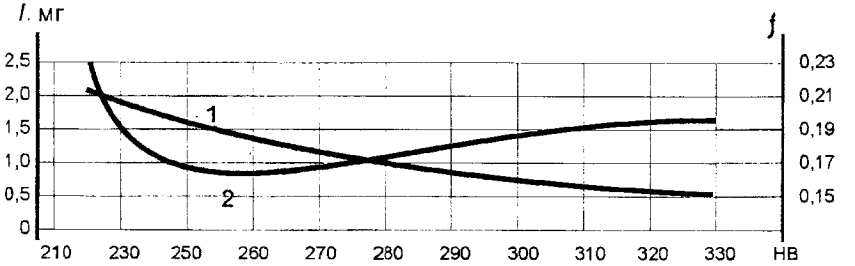


Рис. 6. Влияние твердости чугуна на износ и коэффициент трения: 1 – износ; 2 – твёрдость

С применением метода неравномерной термической обработки, разработанного проф. Л.П. Клименко, создавалась различная твердость по длине втулок. Её распределение показано на рис. 7, где в крайних зонах твердость соответственно была 220 и 330 НВ. Такое различие в твердости рабочих поверхностей привело к изменению эпюры износа втулки или зеркала цилиндра по высоте, что хорошо видно при сравнении кривых 2 и 1 на рис. 5.

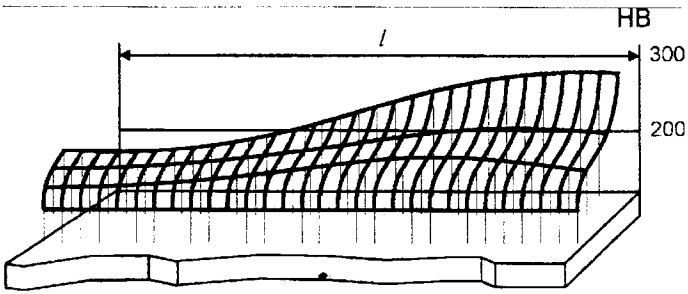


Рис. 7. Распределение твердости по высоте втулки после упрочнения (дизель 8ЧН 25/34)

Отметим, что для износов цилиндров, отлитых вместе с блоком, закономерным является:

- неравномерный износ цилиндра по высоте, где наиболее сильно изнашивается верхняя зона цилиндра;
- неравномерный износ цилиндра по окружности, где наибольшие износы наблюдаются в плоскости качания шатуна и минимальные – в плоскости, проходящей через ось цилиндра и ось коленчатого вала.

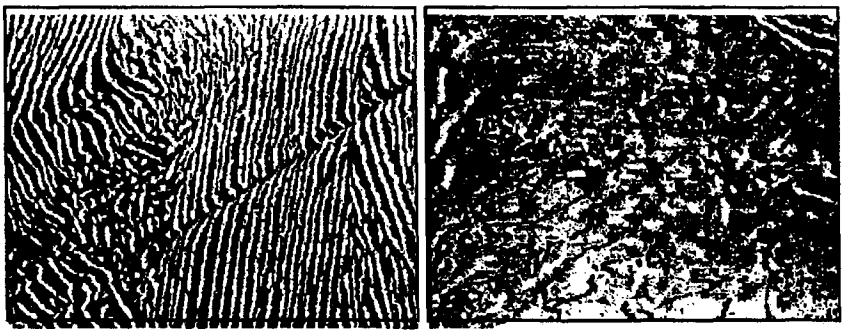
Неравномерный износ цилиндров сильно ухудшает все показатели работы двигателя: падает мощность, ухудшается запуск, сильно возрастает расход топлива и масла, забрасываются маслом свечи зажигания, увеличивается токсичность отработанных газов. Ремонт двигателя связан с полной разборкой, расточкой и хонингованием цилиндров и полной заменой всех деталей поршневой группы.

Предложенная технология изготовления блоков цилиндров с переменной износостойкостью рабочей поверхности позволяет получать отливки блоков с заданной структурой чугуна в зоне рабочей поверхности цилиндра без дополнительной упрочняющей обработки. Отливались блоки цилиндров двигателей ВАЗ непосредственно на заводской автоматической линии. Комплексно-легированный серый чугун по заводской нормали выплавлялся в индукционной печи. Отливка осуществлялась в сухие песчано-глинистые формы по металлическим моделям при строгом контроле химсостава, температуры выплавки и заливки чугуна.

Изменение заводского технологического процесса проводилось на стадии охлаждения отливки. С целью воздействия на материал блока цилиндров в области температур перлитного превращения выбивка отливки из формы производилась ранее предусмотренной на заводе. На позиции литейного конвейера в галерее охлаждения, соответствующей температуре отливки 850...900 °С, опока с отливкой снималась с конвейера и подавалась на выбивную решетку. После выбивки стержней температура отливки составляла 750...800 °С. С этого момента на выбивной решетке проводилось ускоренное охлаждение внутренней поверхности цилиндров водо-воздушной смесью с помощью специальной форсунки.

Охлаждение прекращалось через 30...45 с после охлаждения поверхностей цилиндра до 250...300 °С. За счёт тепла остальной массы отливки температура внутренней поверхности цилиндра повышалась до 450...500 °С, и происходил высокий самоотпуск чугуна.

Важно подчеркнуть, что охлаждению подвергались зоны в верхней части цилиндра в плоскости качания шатунов, что снижало эллипсность отверстий из-за неравномерной твердости по периметру втулки.



а) *б)*

Рис. 8. Электронная фотография микроструктуры перлита: а) верхней зоны, ×8000; б) нижней зоны, ×8000

Изучение структуры (рис. 8) и свойств чугуна вдоль образующей цилиндра показало, что твердость меняется от 217 НВ практически по всему сечению отливки до 241 НВ в зонах максимального упрочнения. Столь незначительное увеличе-

ние твердости объясняется снижением ее в зонах упрочнения за счет высокого отпуска. На структуру металлической матрицы влияние упрочнения более существенно. Дисперсность перлита увеличивается практически вдвое. Распределение и форма графитовых включений практически идентичны в пределах всей отливки, так как охлаждение производилось после окончания процесса графитизации.

Таким образом, разработанная технология отливки блока цилиндров автомобильных двигателей позволяет улучшить качество металла, повысить его износостойкость в самых ответственных местах деталей и в результате повысить общий ресурс двигателя. Предлагаемая технология проста, не требует дополнительных затрат энергии на нагрев под термообработку, сокращает время выдержки заготовки в форме, способствует повышению производительности литейных конвейеров и уменьшает пылеобразование при выбивке. Применение методов неравномерной термической обработки втулок и блоков цилиндров из чугунов показали значительное повышение их износостойкости в зоне верхней мёртвой точки, что представляет большой практический интерес.

Термообработка инструментов

Термообработка сверл. Сверла в основном изготовляют составными: рабочую часть из быстрорежущей стали, а хвостовую – из конструкционной. Непосредственно после сварки этих частей заготовку сверла подвергают отжигу, а после обработки резанием – закалке и отпуску.

Нагрев рабочей части сварных сверл из быстрорежущей стали проводят в соляных ваннах или в печах, используя приспособления, приведенные на рис. 9. Удобнее пользоваться соляными ваннами с несколькими тиглями. В первой ванне сверла подогревают до 600-650 °С. Окончательный нагрев до температуры закалки (для быстрорежущей стали) осуществляется в третьей ванне. Продолжительность нагрева сверл под закалку указана в табл. 27. После выдержки при температуре закалки охлаждение проводят в масле, подогретом до 90-140 °С. Сверла охлаждают в нем до 250-200 °С, а затем на воздухе. Охлаждение можно проводить в соляной ванне до 500-550 °С, а затем на воздухе. Отпуск проводят в шахтных печах с принудительной циркуляцией воздуха при 550-570 °С.

При термической обработке хвостовика сверла его погружают в соляную ванну, нагретую до 820-740 °С, выдерживают, после чего охлаждают в 5%-ном растворе NaCl до температуры 150-200 °С, а затем на воздухе. После закалки хвостовик отпускают в соляной ванне при 450-500 °С.

Нагрев сверл из легированной или углеродистой стали проводят в соляной ванне, после чего охлаждают в селитровой или масляной ванне до 150-180 °С, а затем на воздухе. Отпуск сверл из различных марок легированных сталей, кроме стали 9ХС, проводят в масляной ванне при 150-180 °С в течение 1-2 ч. Сверла из стали 9ХС отпускают в масляной ванне или в электропечах при 180-200 °С в течение 1,5-2 ч. Сверла из углеродистой стали охлаждают в воде до 180-200 °С, а затем переносят в масло.

Оптимальным для сверл из стали Р6М5К5 является следующий режим: предварительный нагрев до 1000 °С, окончательный до 1230 °С; температура ванны для изотермической закалки 500 °С; одно-, двукратный отпуск при 580 °С в течение 30 мин и последующее охлаждение на воздухе.

Твердость рабочей части сверл из легированной и углеродистой стали диаметром до 10 мм должна быть 59-63 HRC, диаметром более 10 мм 61-64 HRC.

27. Продолжительность (мин) нагрева сверл в соляных ваннах и камерных печах

Диаметр сверл, мм	Число одновременно нагреваемых сверл	Продолжительность нагрева стали	
		Быстрорежущей	Углеродистой и легированной
3-5	10-12	0,17 – 0,25 / 0,4 – 0,5	0,54 – 0,75 / 3 – 4
6-8	6-8	0,14 – 0,5 / 0,8 – 1,0	0,8 – 1,1 / 5 – 6
10-12	4-5	0,66 – 0,83 / 1,4 – 1,6	1,3 – 1,5 / 7 – 8
14-16	3-5	0,83 – 1,0 / 1,6 – 2	1,8 – 2,2 / 10 – 12
18-20	2-3	1,0 – 1,3 / 2,0 – 2,5	2,3 – 2,6 / 14 – 15
22-25	2	1,3 – 1,5 / 2,5 – 3,0	2,9 – 3,2 / 16 – 18
26-30	1	1,6 – 2,0 / 3,2 – 4,0	3,5 – 3,8 / 20 – 22
33-37	1	2,4 – 2,8 / 4,8 – 5,6	4,5 – 5,0 / 24 – 26

Примечание. В числителе – продолжительность нагрева в соляной ванне; в знаменателе – в камерной печи.

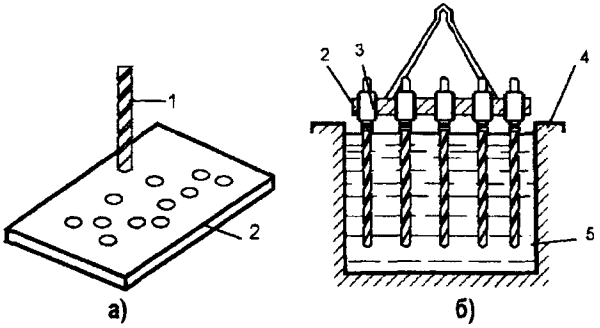


Рис. 9. Приспособления для нагрева сверл в печах *(а)* и в соляных ваннах *(б)*:
1 – сверло; 2 – плита; 3 – втулка; 4 – ванна; 5 – охлаждающая среда

Термообработка зенкеров. Зенкеры из быстрорежущей стали подвергают термической обработке для получения твердости поверхности HRC: 62-64 рабочей части, до 30-45 хвостовой части. Технологический процесс термообработки зенкеров и оборудование приведены в табл. 28.

При термообработке сварного хвостовика зенкера, изготовленного из стали 45, выполняют следующие операции: первый подогрев в шахтной пламенной печи до температуры 120-130 °С с выдержкой при этой температуре в течение 7 мин; окончательный нагрев в соляной ванне до 850-880 °С с выдержкой 2 мин; охлаждение в воде; нагрев в шахтной печи или в соляной ванне до 450-550 °С; выдержка при этой температуре (продолжительность выдержки зависит от размеров зенкера).

После термообработки осуществляют контроль твердости рабочей части зенкеров тарированным напильником. Зенкеры диаметром до 6 мм контролируют на твердость в количестве 10% от партии. У 5-10% инструментов от партии определяют твердость хвостовой части, у 10% – кривизну.

Термообработка метчиков. Метчики изготовляют из углеродистых, легированных и быстрорежущих сталей. Нагрев метчиков под закалку проводят в соляной ванне. В результате обеспечивается получение высокой твердости поверхностных слоев металла при вязкой сердцевине, уменьшается деформация резьбы и увеличивается стойкость метчика.

Метчики из быстрорежущей стали нагревают преимущественно в два приема при температурах 400-500 и 800-850 °С. Охлаждение проводят в селитровой ванне, нагретой до 450-400 °С, или в масле, нагретом до 150-200 °С, с последующим охлаждением на воздухе.

В селитровую или масляную ванну метчики погружают в вертикальном положении, перемещая их по кругу вверх и вниз. Метчики из углеродистой стали диаметром до 8 мм охлаждают в масле; диаметром более 8 мм – в воде (до потемнения) с последующим переносом в масло. Отпуск метчиков проводят в масляной ванне при температуре 150-180 °С в течение 1-2 ч.

Твердость режущей части метчиков контролируют тарированным напильником. Твердость HRC метчиков должна составлять: из быстрорежущей стали 61-65; из углеродистой и легированной стали: 57-60 (диаметр метчиков 1-6 мм), 58-62 (диаметр 7-15 мм), 59-63 (диаметр более 15 мм). Ориентировочная продолжительность нагрева метчиков под закалку приведена в табл. 29.

В отличие от сверл метчики могут не иметь высокой твердости по всему сечению. При вязкой сердцевине уменьшается опасность поломки метчиков при правке или работе. Под закалку метчиков малых диаметров с мелким шагом резьбы их нагревают до нижнего предела технологических температур.

Термообработка резцов из быстрорежущей стали осуществляется после напайки и приварки пластинок к стержню. Если пластинки напаяны припоем ГФК, то термообработку резцов проводят в такой последовательности: окончательный нагрев под закалку (например, для стали типа Р9 до 1230-1250 °С), продолжительность нагрева приведена в табл. 30; охлаждение на воздухе до 1050-980 °С; охлаждение в масле до 180-120 °С; двукратный отпуск в селитровой ванне при 540-560 °С с выдержкой около 1 ч.

Если пластинки приварены с использованием сварочных порошков, то после полного охлаждения резца проводят термообработку в такой последовательности – ступенчатый нагрев до температур, °С, вначале до 820- 850 °С, затем до 960-980 °С и до 1240-1300 °С; охлаждение в масле или в струе холодного воздуха; отпуск при температуре 540-560 °С с выдержкой в печи в течение 2-3 ч (в зависимости от сечения); охлаждение в масле или в струе холодного воздуха. Твердость режущей части резца после отпуска должна быть 62-65 HRC.

28. Параметры технологического процесса термообработки зенкеров из быстрорежущей стали, применяемое оборудование

Операция	Температура, °С	Оборудование (среда)	Время выдержки, мин
Первый нагрев	500-600	Камерная электрическая или пламенная печь	$\tau = \frac{D_{\text{расч}} \cdot l}{4l + D}$
Второй нагрев	850-880	Ванна (78%BaCl и 22%NaCl)	$\tau = \frac{10D_{\text{расч}} \cdot l}{4l + D}$
Окончательный нагрев	1230-1240 (для стали типа Р9) 1270-1280 (для стали типа Р18)	Ванна (BaCl)	$\tau = \frac{5D_{\text{расч}} \cdot l}{4l + D}$
Охлаждение	450-600	Ванна (расплав солей)	Такое же, как при первом нагреве, затем на воздухе
	90-140	Бак (масло)	До температуры 200-250 °С в масле, затем на воздухе
	20-40	Спокойный воздух для зенкеров диаметром до 10 мм; струя воздуха для зенкеров диаметром свыше 10 мм	До полного охлаждения
Отпуск (двукратный или трехкратный)	560-570	Соляная ванна или электровоздушная печь	1 ч с момента прогрева партии заготовок до температуры отпуска

Обозначения: l – глубина погружения зенкера в ванну нагрева, равная величине зоны закалки плюс 0,5 D, см; D – диаметр зенкера; см $D_{\text{расч}}$ – расчетный диаметр, см; $D_{\text{расч}} = D - h$ (h-высота зуба, см); K – коэффициент (для пламенных печей $K = 30$, для электропечей $K = 35$).

29. Продолжительность нагрева под закалку в зависимости от материала метчиков и применяемого оборудования

Диаметр метчиков, мм	Число одновременно нагреваемых метчиков	Продолжительность нагрева, мин		
		Быстрорежущей стали в соляной ванне	углеродистой стали	
			В соляной ванне	В камерной печи
2	15-20	0,25-0,35	0,50-0,58	2-3
3	10-15	0,33-0,40	0,05-0,80	3-4
6	8-10	0,66-0,88	1,0-1,3	4-6
8	8-10	0,8-1,0	1,5-1,8	6-7
10	8-10	1,0-1,1	2,0-2,2	7-8
12	6-8	1,4-1,5	2,4-2,6	9-10
14	6-8	1,5-1,6	3,1-3,3	10-11
18	6-7	2,0-2,2	4,0-4,2	13-14
20	4-5	2,2-2,4	4,3-4,5	15-16
24	3-4	2,4-2,6	5,3-5,5	18-20

30. Продолжительность нагрева под закалку резцов из быстрорежущей стали в зависимости от используемого оборудования

Размер наименьшей стороны сечения резца, мм	Число одновременно нагреваемых резцов	Продолжительность нагрева, мин	
		В высокотемпературной соляной ванне	В камерной печи
10	6-8	От 1,2 до 1,5	От. 2,5 до 3,0
12	6-7	Св. 1,5 » 2,0	Св. 3,0 » 4,0
16	5-6	» 2,0 » 2,5	» 4,0 » 5,0
20	3-5	» 2,5 » 3,0	» 5,0 » 6,0
25	2-4	От 3,2 » 4,0	» 6,0 » 8,0
30	2-3	Св. 4,0 » 5,0	» 8,0 » 10,0

Термообработка фрез (червячных, цилиндрических, торцовых, дисковых, пазовых, отрезных и фасонных) из быстрорежущей стали осуществляется в такой последовательности: первый нагрев до температуры 600-650 °С, второй – до 800-850 °С, окончательный нагрев – до 1270-1290 °С, охлаждение в соляной ванне, нагретой до 500-550 °С, или в масле, температура которого равна 90-140 °С, с последующим охлаждением до температуры 200-250 °С на воздухе; промывка, трехкратный отпуск в соляной ванне при температуре 550-570 °С; промывка и пассивирование; контроль твердости. Продолжительность нагрева фрез под закалку приведена в табл. 31 и 32.

31. Продолжительность (мин) нагрева под закалку цилиндрических фрез в зависимости от их материала и применяемого оборудования

Размер фрезы, мм		Число одновременно нагреваемых фрез	Продолжительность нагрева стали			
			Быстрорежущей		Легированной	
Диаметр	Ширина		В соляной ванне	В камерной печи	В соляной ванне	В камерной печи
40	50	2	1,1-1,2	2,2-2,4	2,2-2,4	10-11
50	60	2	1,4-1,5	2,8-3,0	2,8-3,0	12-13
60	60	2	1,8-2,0	3,6-4,0	3,6-4,0	14-16
75	75	1	2,6-2,8	5,2-5,5	5,2-5,6	18-26
90	100	1	3,8-4,0	7,6-8,0	7,6-8,0	22-24

Сборные фрезы (концевые и шпоночные) термически обрабатывают по такому же режиму, как и сварные сверла. Прорезные фрезы нагревают в вертикальном положении. Дисковые фрезы толщиной до 2,5 мм во избежание деформации охлаждают между металлическими плитами. Отпуск должен быть двукратным при 550-570 °С. Закалку в масле проводят при горизонтальном положении червячных фрез. Фрезы из углеродистой стали после нагрева под закалку в соляной ванне охлаждают в воде и затем – переносят в масло. Выдержка в воде должна быть наименьшей во избежание появления трещин. Например, фрезу диаметром 25 мм охлаждают в воде 34 с, после чего помещают в масло.

Прецизионные зуборезные инструменты из сталей типов Р6М5 и Р6М5К5 целесообразно изготовлять с разделением процесса шлифования закаленного

32. Продолжительность (мин) нагрева под закалку концевых фрез в зависимости от их материала и применяемого оборудования

Диаметр	Число одновременно нагреваемых фрез, шт	Продолжительность нагрева стали			
		Быстрорежущей		Углеродистой и легированной	
		В соляной ванне	В камерной печи	В соляной ванне	В камерной печи
3-4	10-15	0,3-0,35	0,8-1,0	0,6-0,8	3-4
5-6	8-10	0,5-0,58	Св. 1,0 до 1,2	1,0-1,3	5-6
7-8	6-8	0,75-0,9	1,5-1,7	1,5-1,8	Св. 6 до 7
10-11	6-8	1,0-1,1	Св. 1,8-до 2,0	2,0-2,2	Св. 7 до 8
12-15	5-6	1,1-1,3	» 2,0 » 2,5	2,4-2,6	12-13
16-17	5-6	1,5-1,6	3,0-3,5	3,5-3,8	Св. 13 до 14
18-19	4-5	1,7-1,8	Св. 3,5 до 4,0	4,0-4,5	15-16
20-21	3-4	2,0-2,2	» 4,0 »4,5	Св. 4,5 до 5,0	17-18
22-26	3-4	2,3-2,4	Св. 4,5 до 5,0	Св. 5,0	Св. 18
27-28	2-3	2,5-2,8	» 5,0 » 5,5	до 5,5	до 20

инструмента на предварительное и окончательное. В этом случае последующий дополнительный отпуск при температуре 500 °С в течение 1 ч (после предварительного шлифования) и 200 °С в течение 1 ч (после окончательного шлифования) наиболее надежно стабилизирует размеры инструмента при хранении.

После окончательной термообработки контролируют твердость фрез твердомером или тарированным напильником. Она должна составлять 62-65 HRC. Качество отпуска проверяют магнитным методом у 5-10% фрез из партии.

Термообработка плашек. Плашки должны иметь повышенную вязкость. В целях предотвращения выкашивания режущей части их нагревают под закалку до нижнего предела интервала температур с минимальной выдержкой. Продолжительность нагрева плашек под закалку приведена в табл. 33. Предварительный подогрев плашек под закалку проводят в соляной ванне до температуры 750-780 °С; плашек диаметром более 25 мм – до температуры 400 °С. Во избежание обезуглероживания поверхности резьбы нагрев ведут в хорошо раскисленной соляной ванне. При окончательном нагреве в камерной печи плашки покрывают слоем буры. Во избежание коробления не допускается провисание плашек в печи. Время выдержки в камерной печи – 1 мин на 1 мм^2 площади сечения плашки.

Плоские плашки для уменьшения коробления охлаждают под прессом между плитами, охлаждаемыми водой.

Тангенциальные плашки охлаждают в селитре при температуре 450-500 °С или в масле при 150-200 °С, а затем – на воздухе. Плоские плашки отпускают при температуре 160-170 °С в течение 24 ч. Для тангенциальных плашек проводят двукратный отпуск по 1 ч при температуре до 540-580 °С. Твердость плашек должна быть 59-61 HRC.

Контроль твердости проводят твердомером. Тарированным напильником проверяют обезуглероживание резьбы. Накатные плашки из стали Х12Ф1 изготовляют из поковок с последующей термической закалкой. После образования резьбы плашки подогревают в печи до 810 °С, а затем окончательно – в хлорбариевой ванне до 1050 °С. Для предупреждения коробления их охлаждают в вер-

33. Продолжительность нагрева круглых плашек под закалку в зависимости от применяемого оборудования

Толщина плашки, мм	Число одновременно нагреваемых плашек	Продолжительность нагрева, мин	
		В соляной ванне	В камерной печи
6	10-12	1,6-1,8	6-7
7	10-12	1,8-2,0	7-8
9	8-10	2,3-2,5	8-9
11	8-10	2,5-2,8	9-10
14	6-8	2,8-3,0	10-11
18	6-8	3,2-3,5	14-15
22	5-6	4,2-4,5	17-18
25	5-6	4,7-5,0	22-24
30	4-5	6,0-6,5	28-30
36	3-4	7,5-8,0	36-38

тикальном положении в течение 15 мин в растворе селитры, нагретом до 450 °С. Затем плашки помещают в ванну с маслом при температуре 80 °С. Отпуск плашек проводят в электропечи при температуре 450 °С в течение 3-4 ч. Интервал времени между закалкой и отпуском не должен превышать 2 ч. Твердость накатных плашек после отпуска должна быть 56-58 HRC.

Термообработка протяжек. Протяжки изготовляют из быстрорежущих или легированных сталей ХВГ, Х12Н, ХГ и др. Для уменьшения деформации термообработку длинных протяжек выполняют 3 раза: после предварительной обработки резанием, после окончательной обработки резанием и после шлифования.

Термообработку после предварительной обработки резанием выполняют в такой последовательности: нагрев до температуры закалки с предварительным подогревом, охлаждение в масле, отпуск при температуре 770-790 °С, правка. Вместо закалки с высоким отпуском можно проводить отжиг в чугунной стружке или угле.

Термообработка после окончательной обработки резанием включает подогрев до 800-850 °С в вертикальной шахтной печи или соляных ваннах (при нагреве в шахтных печах для уменьшения обезуглероживания и окисления поверхности протяжки обертывают листовым асбестом; после нагрева в течение 15-30 мин их освобождают от асбеста, рабочую часть посыпают бурой и несколько минут повторно нагревают для расплавления буры, после чего переносят в печь для окончательного нагрева) окончательный нагрев в шахтной электрической печи или в соляных ваннах, охлаждение в масле в вертикальном положении до 300-400 °С, горячая правка под прессом, охлаждение на воздухе в подвешенном состоянии, двукратный отпуск по 1 ч при температуре 550-580 °С, правка, очистка, нормализация хвостовой части.

Термообработка протяжек после шлифования заключается в отпуске в масляной ванне при температуре 200-250 °С для снятия внутренних напряжений, возникающих при шлифовании. Если корпус протяжки сваривается с хвостовиком из стали 40Х или 50, то твердость хвостовика должна быть 35-45 HRC. Требуемая твердость хвостовика может быть получена при нормализации или закалке при нагреве в соляной ванне или на установке ТВЧ до 840-850 °С, охлаждении в масле и отпуске хвостовика в селитре.

При термообработке протяжек необходимо соблюдать следующие условия: при всех операциях протяжки должны находиться в вертикальном положении в

подвешенном состоянии, окончательный нагрев протяжек малой длины следует проводить в соляной ванне, а длинных – в шахтной печи (при отсутствии таковых нагрев ведут в горизонтальной печи на подставках); при охлаждении во время закалки подвешенную протяжку следует перемещать вверх и вниз (плоские протяжки небольших сечений для уменьшения деформации зажимают при охлаждении между охлаждаемыми плитами или под прессом); правку после закалки и отпуска необходимо проводить в горячем состоянии; правку после очистки следует проводить при подогреве сварочной горелкой до температуры отпуска.

Термообработка калибров-пробок. Чтобы уменьшить деформацию калибров, их подвергают улучшению после предварительной обработки резанием, а затем выполняют повторную обработку резанием с припуском на шлифование и доводку. Термическую обработку калибров-пробок выполняют в такой последовательности: предварительный подогрев в тщательно раскисленной соляной ванне до 600-650 °С, окончательный нагрев в соляной ванне до 820-850 °С, охлаждение в соляной ванне и на воздухе до 150-180 °С, а затем в масле до 20-70 °С, обработка холодом в холодильной установке при температуре до –55 °С, промывка в 10%-ном содовом растворе, отпуск в шахтной печи при температуре 160-180 °С, обработка резанием (предварительная доводка), старение при температуре (150±10) °С. Твердость калибров после обработки должна быть 56-64 HRC. Калибры, изготовленные из сталей У10 и У10А, закаливают в воде, а затем в масле.

Продолжительность отпуска зависит от точности размеров калибров. При высокой точности отпуск длится 20-32 ч; при пониженной – 2-3 ч.

Термообработка скоб и шаблонов. Скобы и шаблоны простой формы изготовляют из малоуглеродистой стали, шаблоны или лекала сложной формы – из высокоуглеродистой или легированной.

Термообработку скоб и шаблонов из стали 20 проводят в такой последовательности: цементация, нагрев под закалку в соляной ванне при температуре 780-800 °С, охлаждение в соляной ванне и на воздухе до 150-180 °С и в водяной ванне до 30-40 °С, обработка холодом в холодильной установке при температуре до –20 °С для сохранения размеров, промывка в 10%-ном содовом растворе при 70-90 °С, отпуск при температуре 160-180 °С, старение после шлифования и предварительной доводки в масляной электрованне при температуре 150±10°С.

Если шаблоны или скобы изготовлены из стали 20Х, то отпуск проводят в масле. Продолжительность отпуска зависит от размеров инструмента и глубины цементации. Шаблоны и лекала сложной формы охлаждают с подогревом в расплавленной соли или масле, что значительно уменьшает степень деформации. Чтобы уменьшить деформацию шаблонов и скоб, закаливают только их рабочие поверхности.

Термообработка штампов

Термообработка штампов для горячей штамповки

Рекомендуемые режимы термообработки штампов для горячей штамповки приведены в табл. 34. Охлаждение после отжига (температура нагрева указана в табл. 35) проводят с печью со скоростью 40-50 °С/ч до температуры 350-400 °С, а затем на воздухе. При нагреве под закалку детали штампов загружают в печь при температуре до 400 °С. Нагрев до 650 °С выполняют со скоростью до 80 °С/ч. При температуре 650 °С дают выдержку 2,5 ч для штампов массой до 500 кг и 3-4 ч

34. Режимы термообработки стальных штампов для горячей штамповки

Сталь штампа	Закалка			Отпуск		
	Температура нагрева, °С	Среда охлаждения	Твердость после закалки HRC	Температура нагрева, °С	Твердость после отпуска	
					HB	HRC
У7	800-830	Вода	62-64	370-400	340-375	37-40
7Х3	830-860	Масло	59-61	480-520	364-430	39-45
8Х3	820-850		60-62	480-520	387-430	41-45
4ХС	890-920		52-54	240-270	495-512	51-52
6ХС	Св. 840 до 860	Вода	58-60	240-270	295-512	51-52
	Св. 860 до 880	Масло		350-450	402-430	43-45
5ХНВ	830-860		54-58	520-540	387-430	41-45
				530-550	364-402	39-43
				560-580	321-364	35-39
5ХНТ	830-850		53-58	475-485	387-430	41-45
				Св. 485 до 510	364-402	39-43
				520-540	321-364	35-39
5ХНС	850-870		55-59	500-520	387-430	41-45
				510-530	364-402	39-43
				520-540	321-364	35-39
5ХВГ	840-860		56-58	240-270	495-512	51-52
				420-450	430-460	45-48
5ХГМ	830-870	Воздух	56-58	500-550	306-341	33-37
				575-625	269-306	28-33
		Масло		550-575	388-451	41-47
				575-600	341-388	37-41
				600-625	321-368	35-39
				625-650	306-341	33-37
				650-675	269-306	28-33
5ХНМ	830-860		54-58	520-540	387-430	41-45
5ХГС	840-880	Масло	56-58	550-580	388-451	41-47
				Св. 580 до 610	341-368	37-41
				600-620	321-368	35-39
				Св. 620 до 650	269-306	28-33
4Х5В2ФС	1060-1080		52-54	570-600	-	45-50
4Х5В4ФСН	1060-1070		54-56	600-620	-	45-50
3Х2В8Ф	1120-1140			600-610	-	50
				640-650	-	55
4Х3В2ФМ2	1090-1110			610-620	-	50
				650-660	-	45
30ХГС	890-920	Вода, масло	46-52	520-660	277-310	29-34
35ХГСА	870-900		48-56	600-660	277-310	29-31

Продолжение табл. 34

Сталь штампа	Закалка			Отпуск		
	Температура нагрева, °С	Среда охлаждения	Твердость после закалки HRC	Температура нагрева, °С	Твердость после отпуска	
					HB	HRC
5ХНСВ	850-870	Масло	55-59	520-540 530-550 550-570	387-430 364-402 321-364	41-45 39-43 15-39
3Х2В8	1050-1100		49-52	600-620	402-475	42-48
4ХВ2С	870-900		52-56	240-270 420-450	512-540 430-460	53-55 46-48
5ХВ2С	870-900 870-900		54-57	240-270 420-450	512-540 430-460	53-55 46-48
6ХВ2С	850-875 850-875		58-60	240-270 420-450	512-540 430-460	53-55 46-48
5ХН2ВФ	830-870 830-870 830-870		58 - 60	500-525 525-550 550-575	388-451 341-388 321-368	41-47 37-41 35-39
	830-870 830-870 830-870	Воздух		500-550 525-550 550-575	306-341 341-388 321-368	33-37 37-41 35-39

35. Температура отжига заготовок штампов для горячей штамповки

Сталь штампа	Температура нагрева, °С	Твердость HB	Сталь штампа	Температура нагрева, °С	Твердость HB
7Х3	780-800	187-229	5ХВ2С	800-820	207-255
8Х3	780-900	207-255	5ХВГ	760-790	197-241
			6ХС	820-840	197-241
4ХС	820-840	197-228	30ХГС	Св. 840 до 880	187-228
5ХНТ	760-790	192-235			
5ХНС	790-810	207-255	35ХГС	840-870	197-228
5ХНВ	760-790	197-241	3Х2В8	820-840	207-255
6ХВ2С	780-800	180-217	4ХВ2С	800-820	197-217
5ХНСВ	Св. 790 до 820	207-255	4Х8В2	Св. 820 до 830	207-255

для штампов массой до 1000 кг и более. Дальнейший нагрев до заданной температуры закалки ведут со скоростью 100 °С/ч. Штампы с резкими переходами нагревают с меньшими скоростями. Выдержка при температуре закалки для малых штампов должна быть не менее 5,5 ч; для средних и крупных – 8-9 ч. Для сокращения времени закалки штампов применяют изотермическую закалку.

Перед установкой в печь боковые поверхности штампа с обработанными ручьями обмазывают огнеупорной глиной с асбестом, а зеркало штампа и фигуру засыпают отработанным карбюризатором или прокаленной чугунной стружкой, а затем обмазывают глиной и асбестом. Малые штампы укладывают фигурой вниз на поддон со слоем отработанного карбюризатора толщиной 35-40 мм. Время выдержки на каждые 25 мм наименьшей толщины штампа определяют из условий:

при нагреве в газовой печи малолегированной стали 35-40 мин, стали 3Х2В8, 4Х8В2, 7Х3 и 8Х3 40-50 мин; при нагреве в электрической печи 50-60 мин.

Перед закалкой штампы тщательно очищают от остатков карбюризатора, обмазки и окалины. При закалке штампов в масле не следует допускать их полного охлаждения до нормальной температуры. Крупные штампы охлаждают в масле до 100-150 °С и немедленно помещают в печь для отпуска. Задержка в выполнении отпуска может привести к образованию трещин. Продолжительность отпуска после закалки штампов определяют из расчета на каждые 25 мин наименьшей толщины штампа: для доэвтектоидных сталей (40С, ЗОХГС, 35ХГС, 4ХВ2С и др.) 40-45 мин, для заэвтектоидных – 50-60 мин. Скорость нагрева устанавливают не более 50 °С/ч. После проведения общего отпуска штампов хвостовики подвергают дополнительному отпуску для снижения их твердости. Хвостовики штампов из стали 5ХНТ отпускают при температуре 700-720 °С, нагрев ведут на специальных плитах или в специальных печах. После нагрева и выдержки при указанной температуре штампы охлаждают с печью до температуры 350-500 °С. Последующее охлаждение ведут на воздухе.

Для увеличения эксплуатационной стойкости штампового инструмента наряду с обычной закалкой на заданную твердость рабочая поверхность инструмента подвергается дополнительной закалке с нагревом ТВЧ со скоростью нагрева 20-150 °С/с. В этом случае температура выше обычной технологической температуры на 100-150 °С, твердость поверхности повышается на 5-8 единиц. Микроструктура поверхности – мелкоигольчатый мартенсит, что обеспечивает высокие механические свойства и повышенные эксплуатационные качества инструмента.

В процессе высокочастотной закалки на поверхности инструмента формируются внутренние сжимающие напряжения, совпадающие по направлению с напряжениями, возникающими при штамповке и обеспечивающими высокую прочность инструмента. Напряжения, возникающие на границе закалки ТВЧ и объемной закалки, оказывают растягивающие действия, что обеспечивает упругую деформацию инструмента при штамповке. Дополнительную поверхностную закалку ТВЧ применяют для различного инструмента – пуансонов, вставок, прижимов, изготовленных из специальных штамповых сталей (4Х5МФС, 40ХСМФ, 4Х2МГФ – для горячей штамповки и ШХ15, Х12 – для холодного деформирования).

Стойкость штампов для объемной штамповки крупногабаритных изделий из титановых сплавов и высокопрочных сталей может быть увеличена при использовании следующего метода [а. с. 926042 (СССР)]. Предварительно на рабочей поверхности штампа выполняют компенсационные уклоны. Циклическое нагружение длительностью 5-15 с осуществляют при интенсивности напряжений 150-250 МПа. Между циклами нагружения проводят корректирование гравюры штампа.

Циклическое нагружение (12-15 циклов) до корректирования гравюры штампа проводят при температуре 450-500 °С; нагружение после корректирования гравюры штампа – при температуре 350-450 °С в процессе эксплуатации штампа.

Предварительное нагружение штампа выполняют специальной заготовкой, нагретой до 700-800 °С, которая плотно прилегает к рабочей поверхности штампа.

Для отвода теплоты от штампа в процессе его эксплуатации (с целью поддержания температуры штампа в пределах 350-450 °С) опорные поверхности штампа и опорной плиты профилируют, увеличивая площадь контакта, а на поверхность раздела кладут тонкий пластичный лист металла с хорошей теплопро-

водностью, например, тонкий лист технической меди. Циклическое нагружение штампа осуществляют при температуре 450-500 °С, так как при температуре ниже 450 °С штамп при интенсивности напряжений $G_i < 600$ МПа находится в упругом состоянии и его упрочнение не происходит. При температурах выше 500 °С и $G_i > 250$ МПа наблюдается явление кратковременной ползучести, в результате которой уровень накопленных в процессе тренировки штампа остаточных напряжений снижается и не происходит упрочнения штампа (при рабочих нагружениях штамп находится в упругопластическом состоянии).

Заготовку для штампа, имеющую конфигурацию готового изделия, но с компенсационными уклонами, изготовляют из жаропрочных сплавов, например, из ЖС6-К или ХН77ТЮР. В тех случаях, когда не удается сделать заготовку монолитной, ее изготовляют из составных частей. Температура заготовки должна быть не менее 700-800 °С, поскольку при подстывании поверхности штампа и наличии термосопротивления на поверхности контакта при циклическом нагружении температура рабочей поверхности штампа не будет превышать 500 °С. Затем размеры гравюры корректируют в соответствии с полученной расчетной конфигурацией. При этом происходит перераспределение остаточных напряжений, так как часть металла удаляется. Поэтому сразу после первого нагружения штампа проводят второе. После каждой штамповки проверяют профиль гравюры и конфигурацию получаемого изделия. В случае необходимости после 5-10 штамповок проводят повторное корректирование гравюры штампа.

Вместе с гравюрой штампа обрабатывают его опорную поверхность – делают ее волнистой (в плоскости сечения, нормальной к опорной поверхности, должна получаться синусоидальная кривая). Таким же образом обрабатывают и сопрягаемую поверхность опорной плиты. На поверхность раздела кладут тонкий лист технической меди или алюминия. Через такой лист теплота, образующаяся при работе штампа, легче отводится от него. Предлагаемый способ упрочнения штампов выгоден при производстве крупногабаритных штампованных заготовок типа лонжеронов, дисков и других аналогичных изделий, когда нецелесообразны иные способы упрочнения.

Для увеличения стойкости рабочих элементов вырубных штампов из сталей У8 и У10А первую закалку проводят в масле при температуре нагрева 1200±10 °С. Для предотвращения роста аустенита нагрев до температуры закалки проводят в расплаве соли хлористого бария, в ванне. После закалки осуществляют отпуск при температуре 450 °С. Вторую закалку выполняют по обычному для углеродистых сталей режиму: закалка от температур 800-820 °С, затем низкий отпуск при температуре 180-200 °С. Твердость рабочей поверхности вырубного штампа после двойной закалки 57-59 HRC. Структура стали после двойной закалки с промежуточным отпуском представляет собой мелкоигольчатый отпущенный мартенсит. Двойная закалка с промежуточным отпуском увеличивает стойкость вырубных штампов по сравнению со стойкостью штампов, обработанных по общепринятому режиму.

Термообработка сталей в контролируемых атмосферах

При нагреве металла в контролируемой атмосфере исключаются его окисление и обезуглероживание, появляется возможность назначить меньшие припуски на последующую обработку резанием, исключаются операции очистки

поверхности после термообработки для устранения оксидов, достигается экономия металла до 3% массы помещаемой в печь партии заготовок, повышаются механические свойства и усталостная прочность металла, так как исключается обезуглероживание поверхностного слоя, сохраняется форма поверхностей деталей (особенно лезвийного инструмента и тонких деталей приспособлений), снижается трудоемкость изготовления деталей, улучшаются условия труда в термических отделениях.

В табл. 36 приведен ряд окисляющих и восстанавливающих газов. Из этих газов можно составить нейтральные смеси или смеси, в которых газы взаимодействуют между собой. В последнем случае газы нейтрализуют друг друга при определенных температурах и составе стали, поверхность которой необходимо защитить от окисления и обезуглероживания. Атмосфера печи с такими газами будет нейтральна по отношению к поверхности нагреваемого инструмента. Свойства контролируемых атмосфер и область их применения приведены в табл. 37 и 38.

36. Действие газов на сталь

Газ	Химическая формула	Действие на сталь	Газ	Химическая формула	Действие на сталь
Кислород Углекислый газ Водяной пар	O_2 CO_2 H_2O	Окисляющее	Окись углерода Метан	CO_2 CP_4	Науглероживающее
			Аммиак	NH_3	Азотирующее
Окись углерода Водород Метан	CO H_2 CH_4	Восстанавливающее	Азот Аргон Гелий	N_2 Ar He	Нейтральное
Углекислый газ Водяной пар	CO_2 H_2O	Обезуглероживающее			

37. Температура воспламенения газовых компонентов

Газ	Предельно допустимое содержание газа в смеси воздух – газ, %	Температура воспламенения смеси, °С
Метан	5,00-15,00	650-705
Пропан	2,37-9,50	518
Окись углерода	12,50-74,20	643-658
Водород	4,00-74,20	580-590

Регулирование состава контролируемой атмосферы может осуществляться по точке росы. В табл. 39 даны сведения о температуре точки росы для различного содержания H_2O в газах.

При оценке факторов, влияющих на эффективность теплообмена лучеиспусканием, следует учитывать, что при нагреве в контролируемой атмосфере сталь со светлой поверхностью воспринимает почти в 2 раза меньше лучистой энергии, чем сталь с окисленной поверхностью. Поэтому при прочих равных условиях детали нагреваются дольше, чем в печах с окислительной атмосферой.

38. Классификация и область применения контролируемых атмосфер

Класс атмосферы	Контролируемая атмосфера	Содержание, % (объем. доля)			Температура точки росы, °С	Область применения
		водорода	азота	кислорода		
А	Вакуум	-	-	-	-	Отжиг углеродистых и легированных сталей
В	Газы в баллонах: аргон (99,898%) гелий (99,99%)	0,001 0,01	0,1 -	0,001 -	–50	Отжиг, отпуск и нагрев под закалку углеродистых и легированных сталей
	Водород: торговый чистый	99,8 100	0,2 -	- -	–30 –50	
	Азот: торговый чистый	- 1-3	99,8 99-97	0,2 -	–30 –50	

Правка деталей после термообработки

Деформированные детали после термической обработки подвергают правке одним из следующих способов: в горячем состоянии перед охлаждением при закалке, в штампах и зажимных приспособлениях в процессе закалки и отпуска, со специальным подогревом в интервале температур отпуска стали (для закаленных и отпущенных деталей в холодном состоянии – то же).

Правку в горячем состоянии проводят в процессе ступенчатой закалки после достижения температуры начала мартенситного превращения (200-350 °С). Этот вид правки применяют для сталей с малой критической скоростью закалки. Деталь (в том числе инструмент) помещают на двух опорах выпуклой частью вверх и нагружают до устранения деформации. При этом учитывают упругие деформации после снятия нагрузки. Правку проводят в два-три приема и прекращают по достижении температуры 60-40 °С. Биение осевых деталей после правки проверяют в центрах индикатором, а плоских деталей – на плите щупом. Допуски на биение концевого инструмента (кроме метчиков и сверл) после термической обработки приведены в табл. 40.

39. Температуры точек росы газов при различном содержании H_2O

Температура точки росы, °С	Содержание влаги, % (объем, доля)	Температура точки росы, °С	Содержание влаги, % (объем, доля)	Температура точки росы, °С	Содержание влаги, % (объем, доля)
–8	0,306	2	0,512	10	1,220
–6	0,364	0	0,605	14	1,60
–5	0,397	4	0,810	15	1,71
–4	0,432	5	0,868	16	1,82
–3	0,471	6	0,930	17	1,95
–2	0,512	7	0,998	18	2,08
5	0,397	8	1,070	19	2,22
4	0,432	9	1,140	20	2,36
3	0,471				

40. Допуски (мм) биений концевого инструмента после термообработки

Длина инструмента	Диаметр инструмента					
	до 10		св. 10 до 18		св. 18 до 30	
	Рабочая часть	Хвостовик	Рабочая часть	Хвостовик	Рабочая часть	Хвостовик
До 120	0,08	0,10	0,10	0,12	0,12	0,15
Св. 120 до 260	0,10	0,12	0,12	0,15	0,18	0,18
Св. 260 до 450	0,12	0,15	0,15	0,18	0,18	0,20
Св. 450	0,15	0,18	0,18	0,20	0,20	0,23
Длина инструмента	Диаметр инструмента					
	св. 30 до 50		св. 50 до 80		св. 80	
	Рабочая часть	Хвостовик	Рабочая часть	Хвостовик	Рабочая часть	Хвостовик
До 120	0,15	0,18	0,18	0,20	0,20	0,25
Св. 120 до 260	0,18	0,20	0,20	0,23	0,23	0,27
Св. 260 до 450	0,20	0,23	0,23	0,25	0,25	0,28
Св. 450	0,23	0,25	0,25	0,28	0,28	0,30

Правку в штампах или зажимных приспособлениях проводят при совмещении операций закалки и правки или отпуска и правки.

Деталь, нагретую до температуры закалки или частично охлажденную, зажимают в штампе и в зажатом состоянии охлаждают со скоростью, необходимой для закалки стали данной марки, а затем (также в штампе) подвергают отпуску.

Правке с подогревом подвергают длинные протяжки, удлиненные сверла, хвостовой комбинированный и другой удлиненный осевой инструмент. Для частичного или полного подогрева инструмента используют ванны, печи или установки ТВЧ. При местном подогреве нагревают зону наибольшего прогиба. Температура подогрева не должна быть выше температуры отпуска. Динамическую нагрузку при правке прилагают в месте, противоположном области максимальной деформации. Среднюю статическую нагрузку прилагают непосредственно в месте максимальной деформации в течение длительного времени.

Правку в холодном состоянии проводят в тех случаях, когда деформация незначительна. Инструменты мелкого и среднего размера (сверла, развертки) правят на закаленных стальных плитах слабыми ударами мягкого молотка по месту максимальной деформации. У составного сварного инструмента большой длины под прессом правят незакаленные части. Цельный инструмент большой длины правят сильными ударами острозаточенного рихтовального молотка массой 1-3 кг. Удары по деформированной части наносят под углом 50-60° по направлению к оси инструмента непосредственно молотком или через специальные ножи.

Контроль качества термообработки

Для определения качества термообработки применяют различные методы неразрушающего контроля с использованием просвечивания деталей, измерения интенсивности распространения в испытуемом объекте механических ко-

лебаний, определения электрических и магнитных свойств, а также методы, основанные на использовании физико-механических свойств жидкостей, газов и т.д.

Тепловой контроль термических операций проводят с помощью контрольно-измерительных, регулирующих и регистрирующих приборов, в которых в качестве датчиков измерения температуры использованы термометры и термопары. Термометры могут быть ртутные, манометрические и сопротивления. Ртутными термометрами измеряют температуру жидкой и газообразной сред в пределах –50 ÷ +500 °С. Манометрические термометры применяют для измерения температур в пределах –40 ÷ +500 °С и для автоматического регулирования температур; термометры сопротивления (термопары) – для измерения температур в пределах –120 ÷ +1300 °С. Такие термометры поставляют двух видов: показывающие и самопишущие.

Контроль твердости термообработанных поверхностей. При контроле твердости технологической оснастки по методу Роквелла определяют глубину проникновения в металл алмазного или стального наконечника. Ее выражают в условных единицах, называемых числом твердости по Роквеллу. Угловое перемещение стрелки на одно деление шкалы прибора (единица твердости) соответствует $2\text{-}10^{-6}$ мм глубины вдавливания. Наличие окалины, грубых рисок и других дефектов искажает результаты измерений.

Для приближенного определения твердости пользуются тарированными напильниками плоской, квадратной или треугольной формы, предварительно термически обработанными на различную твердость насечки с интервалом 3-5 единиц по Роквеллу. Тарирование напильников проводят по специальным эталонным плитам, твердость которых точно определена прибором. Твердость насечки напильника обозначают на его нерабочей части (например, 56 HRC, 60 HRC и т. п.). При контроле твердости детали подбирают такую пару напильников с минимальным интервалом по твердости, чтобы напильник с меньшей твердостью скользил по поверяемой поверхности, а напильник с большей твердостью слегка ее царапал. Следовательно, твердость исследуемой поверхности будет находиться в пределах твердости напильников.

Контроль сплошности металла с помощью дефектоскопа. Исследуемую деталь намагничивают на специальных установках – *магнитных дефектоскопах.* Поверхность ее смачивают суспензией, состоящей из 0,5 кг порошка оксида железа и 1 л трансформаторного масла. В местах несплошности металла осаждаются частицы оксида железа, в результате чего рельефно выделяется дефект. После контроля деталь размагничивают в соленоиде.

При люминесцентном методе контроля поверхностных дефектов немагнитных металлов элементы контролируемой детали погружают в специальную жидкость, содержащую флюороль – вещество, которое светится под действием ультрафиолетовых лучей. Затем деталь промывают водой, при этом жидкость удаляется только с гладкой поверхности, а в дефектных местах она остается. После этого на поверхность насыпают мелкий порошок, обычно силикагель. Порошок впитывает жидкость из полостей и остается по краям дефекта при последующей обдувке поверхности. Если такую деталь осветить в темном помещении ультрафиолетовыми лучами, места дефектов будут светиться сине-голубым светом.

Метод импульсной ультразвуковой дефектоскопии также применяют для контроля дефектов. Принцип действия ультразвуковых импульсных дефек-

тоскопов состоит в том, что ультразвуковая волна, распространяющаяся в исследуемом материале, при встрече с дефектом, служащим границей раздела двух сред (например, воздушная полость в стали), отражается от этой границы. Отраженные волны принимаются, усиливаются и подаются на индикатор. Импульсные дефектоскопы могут работать с одной стороны. По направленности ультразвуковых волн можно определить месторасположение и очертание дефектов. Для точной отметки глубины залегания дефекта в дефектоскопах применяют *глубиномеры*. Глубиномеры также служат измерителями толщины изделий при доступности их поверхностей только с одной стороны.

Абразивная очистка поверхности заготовок после термообработки

Обработка металлическим песком. При очистке металлическим песком следует учитывать возможность изменения первоначальных свойств стали вследствие внедрения или осаждения металлических частиц на ее поверхности, увеличения шероховатости обрабатываемой поверхности на одно-два значения параметра *Ra*. Для обработки применяют чугунный песок с острыми гранями, получаемый на специальной установке разбрызгиванием и последующим размолом и просеиванием, имеющий твердость 51-56 HRC, среднюю плотность 4,0-4,5 кг/см^3 при максимальной 6,9 кг/см^3. Песок сортируют на фракции на вибрационных ситах.

Обработка абразивными зернами. Регенерированные абразивные зерна получают из перемолотых отходов и использованных абразивных кругов электрокорунда с предельными размерами зерен основной фракции 630-500 мкм (зернистость 50). При обработке абразивными зернами физические свойства поверхности деталей почти не изменяются, т. е. не нарушаются магнитные, коррозионные и другие свойства и не изменяется геометрия детали. Обработанные детали имеют темно-серый цвет. Обработку проводят в обычных аппаратах эжекционного типа.

Гидроабразивная обработка. Преимуществом гидроабразивной обработки является отсутствие выделений пыли; недостатком – необходимость применения специальных герметизированных аппаратов и дополнительных операций по коррозионной защите деталей.

В качестве абразивного материала при гидроабразивной обработке применяют просеянный и просушенный песок зернистостью 160-100, т. е. с размерами зерен основной фракции 2000-1000 мкм. Такой песок (70%) смешивают с водой (30%). Для предохранения деталей от коррозии в смесь добавляют 0,8-1,0% кальцинированной соды или 0,5-1,0% нитрита натрия. После очистки детали промывают и подвергают дополнительной антикоррозионной обработке.

При гидроабразивной обработке от окалины применяют кварцевый песок зернистостью 50-80, т. е. с размером зерен 500-800 мкм. Струя направляется под давлением 0,4-0,6 МПа. Расстояние от распылителя до обрабатываемой детали следует изменять от 80 до 150 мм. Оптимальный угол наклона сопла 45°.

Ультразвуковая абразивная обработка. Для ультразвуковой обработки используют колебания с частотой более 16 кГц. Источником колебаний является ультразвуковой генератор. При таких колебаниях в жидкости возникают поочередно зоны сжатия и растяжения. В момент растяжения происходят местные раз-

рывы жидкости и образуются пузырьки (полости), которые заполняются парами жидкости и растворенными в ней воздухом и другими газами. При сжатии пузырьки съеживаются, что сопровождается сильными гидравлическими ударами. Эти удары очищают поверхность загрязнений и других дефектов. Последовательность выполнения операций ультразвуковой обработки приведена в табл. 41.

41. Последовательность выполнения операций при абразивной ультразвуковой обработке для очистки поверхности заготовок

Обрабатываемые заготовки	Операция	Среда и режим	Примечание
Сложной формы (очистка от продуктов коррозии и других дефектов перед нанесением гальванических покрытий)	Травление	Серная кислота (0,1 г/л воды), соляная кислота (0,05 г/л воды), контакт Петрова (30 г/л воды), температура среды 60 °С, выдержка 2 мин.	Травление проводят одновременно с обезжириванием и удалением дефектов; между временем проведения операций не должно быть перерыва
Из коррозионно-стойкой стали (после термической обработки)	Промывка Обезжиривание Предварительное травление	Проточная вода Бензин Азотная кислота (8-10%), фтористый натрий (45 г/л воды), выдержка 20 мин.	
	Промывка	Проточная вода	
	Ультразвуковая очистка	Сода (3%), температура среды 50-60 °С, выдержка 3 мин	
Из конструкционной стали (очистка от термической окалины перед гальванопокрытием)	Травление	Серная кислота (0,1 г/л воды), соляная кислота (0,05 г/л воды), соль (5 г/л воды), контакт Петрова (30 г/л воды), температура среды 60 °С, выдержка 0,5-5 мин	Травление можно проводить без ультразвука, но с предыдущим снятием штампа в воде с помощью ультразвука
	Промывка	Проточная вода	

Глава 3
УПРОЧНЕНИЕ КРИОГЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Влияние криогенной обработки на структурные превращения и изменения физико-механических свойств стали

В структуре закаленной стали имеется некоторое количество достаточно мягкого остаточного аустенита, что обусловлено ее химическим составом и режимом термообработки. В результате этого понижаются твердость, прочность, теплопроводность и магнитные свойства, возрастает вязкость стали, изменяются размеры, ухудшается качество поверхности изделия. Отпуск закаленной стали с целью ликвидации или уменьшения количества остаточного аустенита в большинстве случаев неэффективен, поскольку не достигается необходимая степень распада остаточного аустенита и его замещения мартенситом. Для улучшения структуры закаленной стали, уменьшения в ее составе количества аустенита, повышения качества и прочности изделий наиболее рационально использовать *криогенный метод* (глубокое охлаждение).

Криогенной обработкой обеспечиваются улучшение механических и режущих свойств инструментов (в том числе из быстрорежущих сталей), повышение их износостойкости и твердости, а также повышение износостойкости контрольно-измерительных инструментов, штампов и пресс-форм, изготовленных из высокоуглеродистых и легированных конструкционных сталей. Увеличивается твердость коррозионно-стойких сталей с повышенным содержание углерода. Улучшается качество поверхностей, подвергаемых полированию или доводке (наличие мягких и вязких аустенитных участков в структуре поверхностного слоя препятствует созданию однородной зеркальной поверхности).

При оценке целесообразности назначения криогенной обработки стали необходимо учитывать следующие факторы: повторное охлаждение закаленной стали не улучшает ее свойств, если при этом не достигаются температуры более низкие, чем при закалке; продолжительность выдержки при отрицательной температуре не оказывает влияния на результаты обработки; наибольшие структурные изменения под влиянием криогенных температур происходят в сталях с повышенным содержанием остаточного аустенита (высокоуглеродистых и легированных, причем в легированных сталях больше остаточного аустенита, чем в углеродистых); закономерности изменения размеров детали в результате аустенитно-мартенситных превращений следует определять опытным путем для конкретного химического состава стали в зависимости от режимов предыдущей термообработки и конфигурации детали; при обработке детали особо сложной формы с неравномерным распределением массы рекомендуется немедленно после закалки применять отпуск для снятия закалочных напряжений; охлаждение ниже нуля непосредственно после закалки увеличивает напряжения и опасность образования трещин; криогенная обработка приводит к росту объема структурных составляющих при распаде остаточного аустенита. В табл. 1 приведены средние коэффициенты расширения аустенитно-мартенситных фаз стали.

Распад остаточного аустенита и превращение его в мартенсит происходят в определенном интервале температур (табл. 2). Если закалка осуществляется при пониженных температурах, то аустенит мало насыщается кислородом, его превращение полностью заканчивается при температуре ниже нуля, и охлаждение не вызывает дополнительных аустенитных превращений. Выполнение закалки при повышенных температурах приводит к образованию аустенита с высокой концентрацией по углероду и легирующим элементам. При охлаждении стали, закаленной при повышенных температурах, до температур, меньших нуля, происходит дальнейшее превращение аустенита в мартенсит. Этот процесс продолжается вплоть до достижения температуры конца мартенситного превращения (табл. 3). Границы температур начала и конца мартенситного превращения существенно зависят от химического состава стали, наличия в ней легирующих примесей. Влияние 1% легирующих элементов на температуру конца мартенситного превращения:

Легирующий элемент	Снижение температуры конца мартенситного превращения, °С
Марганец	45
Никель	26
Ванадий	30
Молибден	25
Хром	35
Медь	7

1. Средние значения коэффициентов расширения структурных составляющих стали

Структурная составляющая стали	Термический коэффициент расширения, °С	
	$\alpha \cdot 10^6$	$\beta \cdot 10^6$
Аустенит	23,0	70,0
Мартенсит	11,5	35,0

2. Температура начала и конца мартенситного превращения для углеродистой стали

Содержание углерода в стали, % (мас. доля)	Температура, °С	
	Начала превращения (точка $M_н$)	Конца превращения (точка $M_к$)
0-0,3	350	200
0,3-1,17	180	–140

3. Влияние криогенной обработки на свойства стали

Сталь	Мартенситные точки, °С		Количество аустенита, %		Прирост твердости (HRC) после обработки
	$M_н$	$M_к$	До обработки	После обработки	
У7	300-250	-50	3-5	1,0	0,5
У8	250-225	-55	4-8	1-6	1,0
У9	225-210	-55	5-12	3-10	1-1,5
У10	210-175	-60	6-18	4-12	1,5-3
У12	175-160	-70	10-20	5-14	3-4
9ХС	210-185	-60	6-17	4-17	1,5-2,5
Х	180-145	-90	9-28	4-17	3-6
ХВГ	155-120	-110	13-45	2-17	5-10

Охлаждение ниже температуры конца мартенситного превращения не вызывает дальнейшего превращения аустенита в мартенсит. Чем больше углерода и легирующих элементов в стали, тем выше температура закалки, тем большее количество остаточного аустенита получается в закаленной стали и, следовательно, тем ниже температура начала $M_н$ и конца $M_к$ мартенситного превращения (см. табл. 3). На количество остаточного аустенита оказывает влияние и скорость охлаждения стали в области температур мартенситного превращения. С уменьшением этой скорости количество остаточного аустенита увеличивается, поскольку основная его часть не успевает преобразоваться и фиксируется. Поэтому в некоторых марках стали не весь аустенит превращается в мартенсит. Определенное количество его стабилизируется, причем чем больше аустенита стабилизируется, тем выше температура закалки и ниже температура мартенситного превращения. Выдержка закаленной стали при нормальной температуре ведет к стабилизации остаточного аустенита. При последующем охлаждении такой стали превращение начинается не сразу, а после циклического гистерезиса в несколько десятков градусов. Продолжительность перерыва между закалкой и криогенной обработкой влияет на степень стабилизации аустенита.

Температура, при которой аустенит стабилизируется, зависит от марки стали (температура стабилизации обозначается M_c). При температуре, превышающей M_c, аустенит не стабилизируется. Если температура M_c ниже 20 °С, то между закалкой и криогенной обработкой может быть промежуток времени любой длительности. Если температура M_c выше 20 °С, то криогенную обработку проводят сразу после закалки. Стабилизирующее влияние выдержки после закалки будет тем больше, чем выше находится точка M_c на температурной шкале. Стабилизация размеров технологической оснастки высокой точности достигается дополнительной термообработкой – старением, выполняемым с длительным нагревом до 120-150 °С после одноразовой криогенной обработки.

Криогенную обработку целесообразно применять для стальных нерегулируемых разверток, расточных блоков, протяжек и прошивок, гладких и резьбовых калибров (скоб, пробок, колец, шаблонов), концевых мер длины, установочных мер, рабочих деталей штампов и пресс-форм, направляющих и фиксирующих деталей станочных приспособлений, контрольных и установочных оправок и др.

Особенности криогенной обработки технологической оснастки из различных сталей

В углеродистых сталях с содержанием углерода более 0,6% в результате криогенной обработки твердость повышается независимо от той температуры, при которой была проведена закалка, т. е. при любой закалочной температуре (рис. 10). Однако при определении температуры окончания процесса криогенной обработки надо учитывать, что положение точки M на шкале температур изменяется с изменением температуры закалки (табл. 4). При закалке от температуры 750-800 °С охлаждение углеродистых инструментальных сталей до –30 °С является достаточным для максимального превращения остаточного аустенита. Однако, чем ниже температура закалки, а следовательно, чем меньше аустенит насыщен углеродом, тем меньше должен быть перерыв во времени между закалкой и криогенной обработкой. Температура мартенситного превращения

4. Зависимость температуры $M_к$ углеродистой инструментальной стали от температуры закалки

Сталь	Температура, °С	
	Закалки	$M_к$
У8	780	0
	1000	–60
У10	780	0
	1000	–90
У12	780	–20
	1000	–100

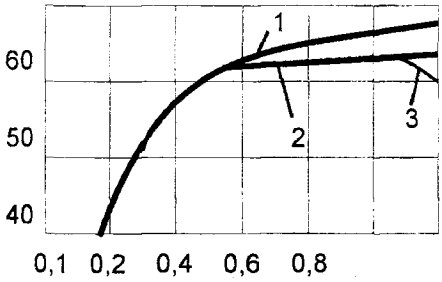


Рис. 10. Зависимость твердости закаленной углеродистой стали от содержания углерода и метода термообработки при нагреве: 1 – выше Ac_3 и обработке при криотемпературах; 2 – выше 780-800 °С; 3 – выше Ac_3

углеродистой инструментальной стали некоторых основных марок приведена в табл. 5.

С повышением температуры закалки быстрорежущей стали количество остаточного аустенита в ней при нормальной температуре возрастает; стабилизируемость его уменьшается. Поэтому криогенную обработку такой стали следует проводить при более низкой температуре. Сталь, закаленная при пониженных температурах нагрева, претерпевает более полное мартенситное превращение. Промежуток времени между операциями закалки и криогенной обработки для такой стали необходимо сократить. Если в процессе охлаждения до 100°С делать остановки, то количество остаточного аустенита увеличится (табл. 6).

Для быстрорежущих сталей преимущества криогенной обработки сохраняются после отпуска при температурах до 580 °С. Если отпуск проводят при более высоких температурах, преимущество предшествующего ему охлаждения ниже нуля исчезает. Для снижения количества остаточного аустенита наиболее эффективна термообработка, включающая в себя отпуск (при 580 °С для стали типа Р18Ф2К8М или 560 °С для стали типа Р6М5Ф2К8 либо Р6М5ФЗ) после закалки, криогенную обработку при –70÷100 °С (для указанных типов сталей) и двукратный отпуск при 560-580 °С. После такой обработки количество остаточного аустенита приближается в стали типа Р18Ф2К8М к 1,9%, в стали типа Р6М5Ф2К8 к 0,52%; твердость стали 65-66 HRC.

5. Температура мартенситного превращения и эффективность охлаждения углеродистых инструментальных сталей ниже 0 °С

Сталь	Границы превращения, °С		Количество (%) остаточного аустенита после охлаждения		Прирост твердости (HRC) после охлаждения до $M_к$
	$M_н$	$M_к$	До 20 °С	До $M_к$	
У7	300-255	-55	До 5	До 1	До 0,5
У8	255-230	-55	3-5	1-5	До 1
У9	230-210	-55	5-12	3-10	1-1,5
У10	210-175	-60	6-18	4-12	1,5-3
У12	175-160	-70	10-23	5-14	3-4

6. Зависимость количества остаточного аустенита в сталях от продолжительности перерыва при охлаждении

Продолжительность перерыва при охлаждении, ч	Полнота превращения аустенита	Количество остаточного аустенита
	%	
0,1	88	До 6,5
1,0	63	9,5
10,0	35	15

Быстрорежущие стали, обработанные при криотемпературах и затем отпущенные, приобретают более равномерную твердость, чем твердость сталей, охлажденных только в масле и отпущенных 3 раза при 560 °С. Для резцов из быстрорежущей стали, обрабатываемой при криотемпературах, рекомендуется двукратный отпуск при 540 °С с выдержкой не менее 1 ч каждый. Средняя стойкость инструментов, охлажденных ниже нуля, на 40-50% превышает стойкость инструментов, не подвергавшихся криогенной обработке. Температура мартенситного превращения легированной инструментальной стали некоторых основных марок приведена в табл. 7.

Криогенная обработка закаленных конструкционных сталей нецелесообразна, так как температура конца мартенситного превращения в таких сталях выше 20 °С. Этот вид обработки применяют для конструкционных сталей, предварительно прошедших цементацию, азотирование или цианирование. Высокое содержание углерода в цементованном слое способствует сохранению в нем остаточного аустенита (особенно в сталях, содержащих такие легирующие элементы, как хром, никель и вольфрам). Твердость и износостойкость цементованных изделий при криогенной обработке повышаются. Режим криогенной обработки сталей с насыщенным поверхностным слоем аналогичен режиму, назначенному для углеродистых или легированных инструментальных сталей с количеством углерода и легирующих примесей, равным количеству, содержащемуся в поверхностном слое.

7. Температура мартенситного превращения и эффективность охлаждения ниже нуля легированных сталей

Сталь	Границы превращения, °С		Количество (%) остаточного аустенита после охлаждения		Прирост твердости (HRC) после охлаждения до $M_к$
	$M_н$	$M_к$	до 20°С	до $M_к$	
7Х	280-230	-55	3-10	1-8	До 1
7Х9	240-185	-60	4-17	2-12	1-2,5
9Х	220-180	-70	6-18	4-13	1-2,5
Х	175-145	-90	10-28	5-14	3-6
9ХС	210-185	-60	6-27	4-12	1,5-2,5
ХВГ	155-120	-110	13-45	2-17	До 10
ХГ	120-100	-120	22-60	До 20	»15
20Х3	140-120	-100	17-40	» 15	» 10
13Н2А	160-140	-95	12-30	3-4	4-7
13Н5А	160-140	-95	12-30	3-14	4-7
12Н5А	120-100	-120	22-60	До 20	До 15
18Х2Н4ВА	130-120	-110	20-45	» 15	» 10

Термообработка инструментальных сталей при криогенных температурах

Внедрение в производство криогенных процессов для обработки инструментальных сталей связано с изменением последовательности операций термической обработки, возможным изменением режимов операций термообработки (цементации или закалки и отпуска), минимально допустимым промежутком времени между окончанием операции закалки и началом охлаждения ниже нуля, т. е. продолжительностью вылеживания при нормальной температуре, оптимальной температурой охлаждения, скорости охлаждения и продолжительности выдержки при низких температурах, обеспечением экономичности процесса (окупаемости затрат, связанных с усложнением технологии).

Детали особо сложной формы с неравномерным распределением массы и резкими переходами по сечению, особенно детали, изготовленные из высоколегированных сталей, характеризуемые сквозным прокаливанием, немедленно после закалки подвергают отпуску для снятия закалочных напряжений. Если такие детали охлаждать ниже нуля, то увеличивается опасность образования трещин. Поэтому их подвергают обычному отпуску, затем охлаждают ниже нуля, после чего подвергают вторичному отпуску при несколько пониженной температуре. При таком выполнении технологического процесса предотвращается опасность возникновения кольцевых трещин в массивных инструментах (например, сверлах, зенкерах, развертках больших диаметров) из быстрорежущей стали, сваренной встык с углеродистой или низколегированной.

При изготовлении технологической оснастки высокой точности (измерительных инструментов, деталей прецизионных приборов и т. п.) требуется обеспечить максимальную стабилизацию размеров. В этих случаях необходимо устранить из структуры закаленной стали остаточный аустенит, сохранившийся в стали в небольших количествах после одноразовой криогенной обработки. Такие превращения происходят при дополнительной обработке – старении изделий при длительном нагреве до 120-150 °С. На рис. 11 приведены графики режимов термообработки различных сталей с применением криотемператур. Схемы приборов для измерения низких температур приведены на рис. 12.

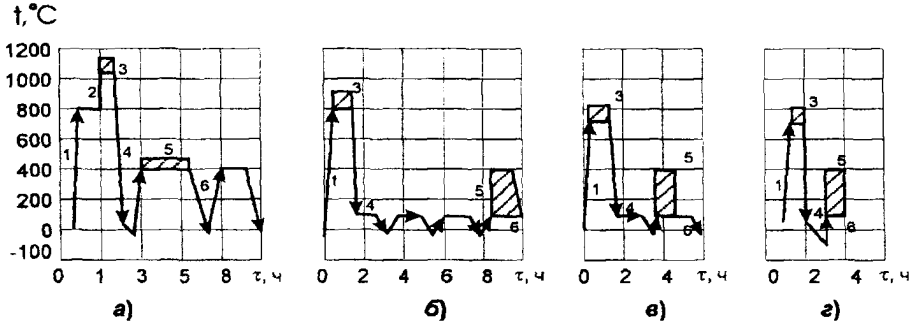


Рис. 11. Графики режимов термообработки с применением криотемператур для сталей: *а* – быстрорежущих; *б* – шарикоподшипниковых; *в* – легированных цементованных; *г* – инструментальных; 1 – предварительный нагрев; 2 – закалка в масле; 3 – интервал температуры закалки; 4 – обработка при криотемпературах; 5 – интервал температуры отпуска; 6 – охлаждение

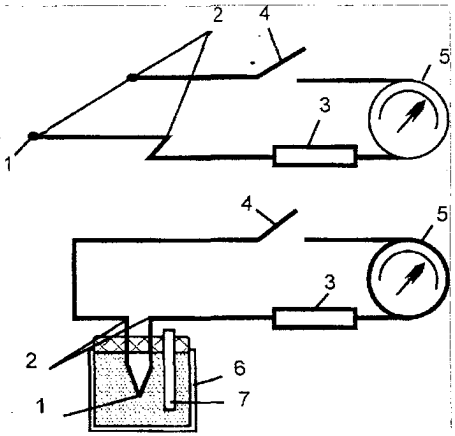


Рис. 12. Схема прибора для замера температур до −150 °С:
1 – рабочий спай термопары хромельникеля; 2 – свободный спай;
3 – сопротивление 420 Ом; 4 – тумблер; 5 – потенциометр;
6 – термос; 7 – термометр

Восстановление технологической оснастки методами криогенной обработки

Восстановление технологической оснастки, в том числе инструмента, воздействием криогенных температур основано на явлении роста объема структурных составляющих инструментальной стали при ее охлаждении в результате распада остаточного аустенита и замещения его мартенситом, удельный объем которого увеличен по сравнению с объемом аустенита (табл. 8).

Процесс восстановления технологической оснастки с применением криогенных температур состоит из следующих операций: очистки, обезжиривания и сушки с помощью смывочных жидкостей и технических салфеток; комплектования технологической оснастки в партии с учетом необходимых температуры обработки и времени выдержки; криогенной обработки каждой партии в отдельности (время выдержки отсчитывают с момента прекращения кипения азота, а при использовании криогенной установки – с момента достижения требуемой отрицательной температуры в криогенном аппарате); оттаивания без использования источников теплоты (на воздухе); просушки после окончания процесса охлаждения (через 0,5-2 ч после полного исчезновения снежного инея); контроля размеров технологической оснастки; доведения полученных размеров до исполнительных (выполняют по технологии, принятой для изготовления новой технологической оснастки) с помощью тонкого шлифования, притирки, хонингования и т. п.

Стабилизация форм и размеров деталей криогенными температурами

В результате самопроизвольных фазовых превращений в стали и перераспределения остаточных напряжений могут произойти изменения размеров и формы деталей при их эксплуатации или хранении на складе. Эти процессы,

8. Зависимость удельных объемов аустенита и мартенсита от количества углерода в стали при 20 °С

Количество углерода в стали, %	Удельный объем, $см^3/г$	
	аустенита	мартенсита
0,2	0,12270	0,12761
0,4	0,12313	0,12812
0,6	0,12356	0,12863
0,8	0,12399	0,12915
1,0	0,12442	0,12965
1,4	0,12528	0,13061

протекающие медленно при нормальной температуре, могут интенсифицироваться под влиянием естественной теплоты рук рабочего, сезонных колебаний температуры, нагрева инструмента при снятии стружки либо в результате действия силы трения в подвижных соединениях и т. п.

Обычным способом стабилизации размеров и формы точных деталей из закаленной стали является отпуск (тепловое старение). Степень стабилизации повышается при дополнительном превращении остаточного аустенита. Для этого часто требуется выполнить отпуск детали при такой высокой температуре, что поверхность детали теряет необходимую по условиям работы твердость.

При обработке стальных деталей криогенным методом их размеры стабилизируются. Такое свойство имеет особое значение для закаленных точных стальных деталей технологической оснастки (например, калибров, измерительных эталонов, точного режущего инструмента, рабочих деталей штампов, пресс-форм и т. п.), так как стабильность их форм и размеров должна быть обеспечена на весь период хранения и эксплуатации. Чем больше остаточного аустенита в структуре стали, тем эффективнее криогенная обработка (табл. 9).

Стабилизация размеров точных деталей становится более эффективной при сочетании тепловых (отпуск, старение) и низкотемпературных методов обработки. В зависимости от требований, предъявляемых к деталям, для сохранения их точных размеров рекомендуются следующие варианты технологического процесса термического упрочнения и стабилизации: закалка, криогенная обработка, продолжительный отпуск, включающий тепловое старение (для деталей повышенной точности, измерительных инструментов и т. п.); закалка и чередующиеся охлаждение ниже нуля и отпуск (или старение) по схеме: охлаждение – отпуск – охлаждение – отпуск (или старение для деталей особо высокой точности, если необходимо обеспечить постоянство конфигурации и размеров). Для размерной стабилизации закаленных стальных деталей необходимо обеспечивать более полное превращение остаточного аустенита, чем для создания максимальной твердости.

Источники криогенных температур

При обработке технологической оснастки в качестве источников умеренного холода, т. е. источников, с помощью которых получают температуры до –70 °С, используют аммиачные и фреоновые установки; для получения криогенной температуры до –135 °С применяют криогенные установки или криогенные аппараты (рис. 13). Криоагентами обычно служат твердый углекислый газ (сухой лед), жид-

9. Влияние криогенной температуры на размерную стабильность стальных деталей при 20 °С

Сталь	Криогенная температура, °С	Твердость HRC	Изменение 1 см длины детали при 20 °С, мкм									
			Не подвергавшейся отпуску					После двукратного отпуска при 150 °С в течение 1 ч				
			За период времени									
			День	Неделя	Месяц	Квартал	Год	День	Неделя	Месяц	Квартал	Год
Углеродистая инструментальная	*1	66,0	0	-90	-175	-265	-405	0	-4	-8	-10	-17
	-50	67,0	0	-110	-205	-310	-480	0	-6	-10	-14	-14
	-160	66,5	0	-120	-240	-350	-525	0	-5	-8	-11	-16
Шарикоподшипниковая	*1	65,0	0	-10	*2	-82	-110	0	-3	-5	-6	-8
	-50	66,0	0	-36	*2	-110	*2	0	-2	-4	-4	-6
	-160	66,0	0	-50	*2	-135	-197	0	-1	-2	-4	-6
Вольфрамовая штамповка	*1	66,0	0	-52	-101	-156	-259	0	-3	-6	-8	-10
	-50	67,5	0	-88	-162	-230	-355	0	-5	-8	-11	-14
	-160	67,5	0	-94	-173	-248	-362	0	-2	-4	-6	-8
Марганцовистая штамповка	*1	64,0	0	-11	-30	-48	-87	0	-1	-2	-4	-6
	-50	64,5	0	-36	-71	-103	-158	0	-3	-5	-7	-8
	-160	65,0	0	-50	-91	-128	-183	0	-5	-8	-10	-13

*1 Приведены изменения 1 см длины необработанной стали при 20 °С.
*2 Нет данных.

кие азот, кислород и воздух (смесь жидких азота и кислорода) и др. Характеристика криоагентов приведена в табл. 10; температуры их кипения при атмосферном давлении указаны ниже.

Криоагент	Температура кипения, °С
Аммиак	–33,5
Углекислота	–78,5
Хлористый метил	–23,7
Азот	–195,8
Смесь твердой углекислоты:	
с хлористым метилом	–82
с хлороформом	–77
с этиловым эфиром	–77
с треххлористым фосфором	–76
с этиловым спиртом	–72
с хлористым этилом	–60
с ацетоном	–78
Фреон	–29,4
Этилен	–105,2
Метан	–161,5
Кислород	–183

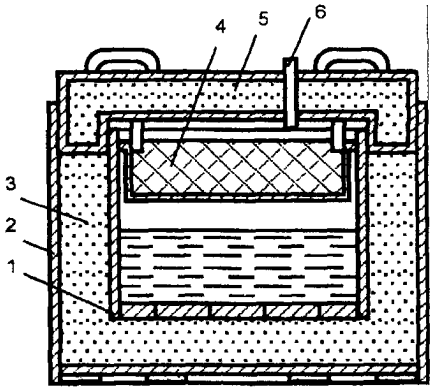


Рис.13. Криогенный аппарат с жидкой ванной: 1 – сварной бак; 2 – контейнер; 3 – теплоизоляция; 4 – сетка с деталями; 5 – крышка; 6 – испарительная трубка

10. Характеристики криоагентов

Криоагент	Агрегатное состояние	$t_{ниж}$, °С	ρ, кДж/кг
Углекислый газ	Твердое	-78,5 *1	574,8 *2
Кислород	Жидкое	-182,8	213,7 *1
Азот	»	-195,8	197,8

*1 Температура сублимации сухого льда при нормальном давлении.

*2 Скрытая температура сублимации, кДж/кг.

Условные обозначения: $t_{ниж}$ – нижняя температура при нормальном давлении; ρ – скрытая теплота испарения при нормальном давлении и температуре кипения.

При отсутствии готового сухого льда его можно получить, дросселируя сжиженный углекислый газ при выходе из баллона через небольшое (диаметром 1,5-3 мм) отверстие сопла (рис. 14).

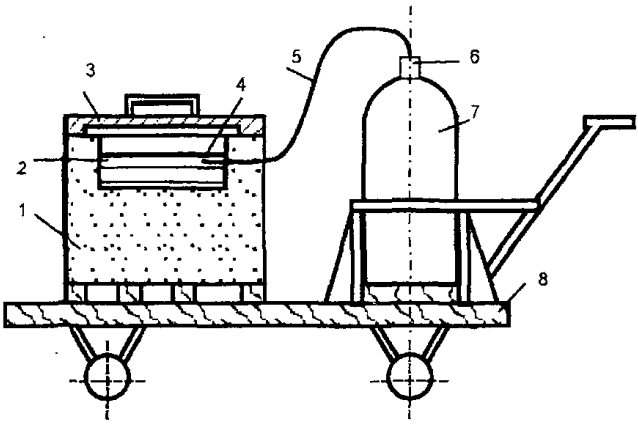


Рис. 14. Передвижной криогенный аппарат с использованием сжиженного углекислого газа:
1 – криоаппарат; 2 – рабочая ванна; 3 – крышка; 4 – сетка; 5 – шланг; 6 – редуктор; 7 – тележка

Приборы контроля криогенных температур

Для измерения криогенных температур в холодильных камерах применяют спиртовые термометры, дистанционные измерители, унифицированные электрические термометры, электронные автоматические уравновешенные мосты.

При отсутствии специальных средств измерения криогенных температур для этих целей можно использовать прибор, изготовленный по простейшим схемам (см. на рис. 12). Для настройки прибора рабочий спай помещают в криогенный аппарат, а свободный спай выводят в атмосферу. Термометром замеряют температуру окружающего воздуха и устанавливают стрелку потенциометра со специально проградуированной шкалой на значении измеренной температуры, после чего прибор готов к работе. Свободный спай может быть помещен в колбу, установленную в термосе, наполненном льдом. Стрелку потенциометра устанавливают на нуль. Для повышения точности показаний потенциометра необходимо следить по спиртовому термометру за тем, чтобы температура свободного спая была постоянно равна нулю.

Глава 4
УПРОЧНЕНИЕ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Насыщение углеродом

Цементация в твердом карбюризаторе – обработка, которой подвергают стальные детали для повышения их твердости, теплостойкости и износостойкости, достигаемых при последующей закалке. Цементацию деталей малой и средней длины проводят в камерных печах; большой длины – в шахтных печах.

Детали укладывают в цементационные ящики с карбюризатором, при этом объем ящиков должен быть таким, чтобы обеспечивался равномерный прогрев деталей за минимальное время. Составы карбюризаторов приведены в табл. 1. Детали укладывают следующим образом: на дно ящика насыпают слой карбюризатора толщиной 30-40 мм, на него помещают детали, затем снова насыпают слой карбюризатора и так далее до верха ящика. Последним сверху должен быть слой карбюризатора (между деталями и крышкой) толщиной 20-30 мм (рис. 11). Детали должны занимать 10-15% объема ящика, карбюризатор – 85-90%. При укладке деталей в ящик необходимо следить, чтобы они не касались друг друга и стенок ящика. Каждый слой карбюризатора во избежание его осадки, а следовательно, провисания деталей необходимо уплотнять, встряхивая ящик. На верхний слой карбюризатора кладут лист асбеста. Ящик закрывают крышкой и обмазывают ее смесью огнеупорной глины с песком.

1. Составы карбюризаторов для цементации

Номер состава	Компонент	Содержание компонента, %	Номер состава	Компонент	Содержание компонента, %
1	Углекислый барий Углекислый кальций Летучие Вода Древесный уголь	20-25 2,5-5 До 10 » 6 Остальное	5	Углекислый натрий Древесный уголь	10 90
			6	Углекислый натрий Древесный уголь	10 90
2	Углекислый барий Углекислый кальций Вода Полукокс	10-15 3,5 До 6,0 Остальное	7	Углекислый барий Торфяной кокс	6-10 90-94
			8	Ацетат натрия Полукокс Древесный уголь Мазут	10 30-35 55-60 2-3
3	Углекислый барий Углекислый натрий Углекислый кальций Мазут или патока Древесный уголь	12-15 1,0-1,5 3,0-5,0 4,5-5,0 Остальное	9	Ацетат бария Полукокс Древесный уголь	10 75-80 10-15
			10	Древесный уголь	100
4	Углекислый натрий Углекислый кальций Древесный уголь	10,0 3,0 Остальное	11	Углекислый натрий Древесные опилки	5-8 92-95
			12	Костяная мука Углекислый натрий Подсолнечная лузга	60 5 35

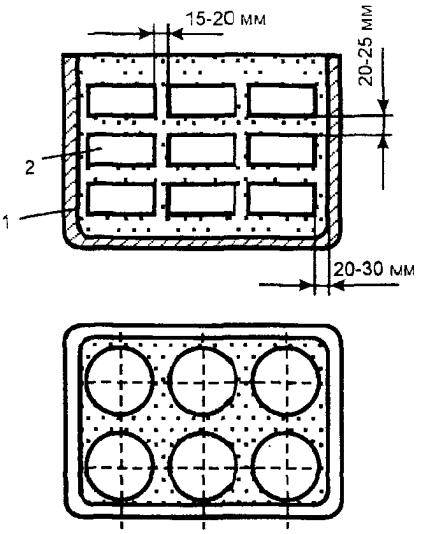


Рис. 15. Схема упаковки деталей в цементационный ящик: 1 – ящик; 2 – детали

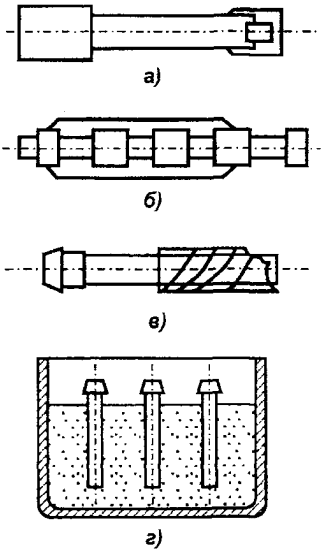


Рис. 16. Местная защита от цементации поверхностей деталей: *а* – колпаком; *б* – трубой; *в* – обертыванием асбестом; *г* – частичной упаковкой в карбюризатор

После естественной сушки ящики ставят в печь, нагретую до заданной температуры. Расстояние между ящиками должно быть не менее 30-50 мм. Продолжительность процесса цементации приведена в табл. 2. При ступенчатом режиме цементации процесс ведут в два этапа: после полного прогрева ящиков с деталями в печи устанавливают рабочую температуру 950 °С. После выдержки температуру в печи снижают до 850 °С и выдерживают ящики с деталями в течение времени, указанного в табл. 3. Разборку ящиков после цементации осуществляют при температуре не выше 100 °С. Остывшие детали должны иметь светло-серую поверхность. При частичной цементации поверхности деталей, не подлежащие обработке, следует защищать (рис. 16) с помощью асбеста, трубок, колпаков и обмазок, состав которых приведен в табл. 4 (обмазки доводят до сметанообразной консистенции).

2. Продолжительность цементации в твердом карбюризаторе при температуре 910-930 °С в зависимости от требуемой глубины цементуемого слоя и размеров ящика

Минимальный размер ящика, мм	Общая продолжительность процесса (ч) при глубине слоя, мм			
	0,5-0,7	0,7-0,9	0,9-1,2	1,2-1,5
100	4-5	5-6	6-7,5	7,5-9
150	4,5-6,5	5,5-6,5	6,5-8,5	Св. 9 до 11
200	5,5-6,5	6,5-7,5	7,5-9,5	10-12
250	6,5-7,5	7,5-8,5	8,5-10,5	11-14

3. Продолжительность цементации в твердом карбюризаторе при ступенчатом режиме обработки в зависимости от требуемой глубины цементуемого слоя

Рабочая температура, °С	Продолжительность цементации (час) при глубине слоя, мм	
	0,7-1,0	1,1-1,5
950 850	1 2	2 3

4. Составы защитных обмазок при цементации в твердом карбюризаторе

Компонент	Содержание компонента, %	Рекомендации по изготовлению и применению смеси
Тальк Глина огнеупорная Вода	50 25 25	В смесь добавляют жидкое стекло до сметанообразной консистенции
Песок Глина огнеупорная Бура Селитра натриевая Окись свинца	40 44 10 3 3	Все составляющие перемешивают и разводят на жидком стекле до получения сметанообразной консистенции
Тальк Окись алюминия Сурик свинцовый	58 28 14	Смесь разводят на жидком стекле (одна часть смеси и три части жидкого стекла)
Глина шамотная Асбестовая крошка	90 10	Смесь разводят на воде до сметанообразной консистенции. Предпочтительно применять для защиты отверстий
Медь однохлористая Сурик свинцовый	70 30	Замешивают на канифольном лаке до сметанообразной консистенции
Песок (кремнезем) Глинозем Окись железа Окись титана Окись магния	60 35 3 0,25 1,75	Разводят на жидком стекле (три части смеси и одна часть жидкого стекла). Пасту наносят в два слоя
Глина огнеупорная Песок сеяный Бура Нитрид натрия	40 45 12 3	Разводят на жидком стекле до сметанообразного состояния. Пасту наносят в два слоя
Маршаллит Бура Тальк	85 2 13	Разводят на жидком стекле
Хромокислый натрий Кальцинированная сода Поташ Жидкое стекло	12 7 4 77	Составы готовят отдельно и смешивают в пропорции 1:1
Маршаллит Каолин	80 20	

Продолжение табл. 4

Компонент	Содержание компонента, %	Рекомендации по изготовлению и применению смеси
Тальк Каолин	66 34	Составы готовят отдельно и смешивают в пропорции 1:1. Разводят на жидком стекле, наносят в два слоя толщиной до 1 мм каждый
Асбестовый порошок Жидкое стекло	35 65	Хранят не более 2 ч с момента приготовления
Окись меди Тальк Жидкое стекло	30 20 50	Наносят в два слоя

Контроль качества цементованных деталей выполняют по образцам-свидетелям, изготовленным из стали той же марки и прошедшим термическую обработку и цементацию вместе с контролируемой партией деталей. Глубину цементованного слоя измеряют по микрошлифам. Контроль качества деталей, цементованных в пастах, аналогичен контролю деталей, цементованных в твердых карбюризаторах. Контроль после газовой цементации выполняют по образцам-свидетелям аналогично контролю деталей после цементации в твердом карбюризаторе. Состав газовой среды в печи контролируется газоанализатором. Температура нагрева деталей контролируется оптическим фотопирометром.

Технология приготовления защитной обмазки, состоящей, например, из 70%-ной однохлористой меди и 30%-ного свинцового сурика, следующая. Смесь замешивают в 15%-ном растворе канифоли в очищенном скипидаре. Компоненты (85 г свинцового сурика и 215 однохлористой меди) просеивают через сито и тщательно перемешивают. В 100 мл скипидара растворяют 15 г канифоли. Затем в пяти объемах раствора замешивают три объема сухой смеси. Готовую обмазку наносят кисточкой на обезжиренные участки поверхности детали слоем 1,0-1,5 мм, просушивают при температуре 100-150 °С в течение 1,0-1,5 ч и охлаждают. Допускается повторное нанесение обмазки. После цементации пленка защитной обмазки удаляется струей воды или металлической щеткой. Инструмент из быстрорежущей стали подвергают цементации для повышения его стойкости. В результате можно получить сталь с мелкими равномерно распределенными карбидами в диффузионном слое. Возрастают твердость и износостойкость, но ухудшаются прочность и вязкость, в структуре стали сохраняется большое количество (до 40%) остаточного аустенита, которое может быть снижено при комплексной термомеханической обработке заготовок (табл. 5) [а. С. 737479 (СССР)]. Способ включает в себя химико-термическую обработку, высокотемпературную термомеханическую обработку (ВТМО), закалку, отпуск и криогенную обработку.

Пример. Режущий инструмент (зенкеры и развертки) изготовляют из быстрорежущей стали Р6М5. Заготовки подвергают высокотемпературной цементации в твердом карбюризаторе при температуре 1150-1200 °С. Выдержка 8 ч. В результате цементации глубина слоя, насыщенного углеродом, достигает 3,2 мм; концентрация углерода в этом слое 1,1%. После цементации осуществляют ВТМО по следующему режиму: нагрев до температуры аустенизации 1200 °С; подстуживание до 1050 °С; горячее

5. Режим комплексной обработки заготовок на стали Р6М5 для снижения количества остаточного аустенита

Операция	Температура, °С	Количество остаточного аустенита в зависимости от вида обработки, %
Цементация	1150	-
ВТМО:		
аустенизация	1200	-
деформация	1050	-
Закалка	В масле	57
Отпуск (первый)	560	40
Отпуск (второй)	560	35
Обработка при криотемпературах	-196	16

гидродинамическое выдавливание заготовок: зенкеров со степенью деформации 72% и разверток – 65% за проход, без пресс-остатка: немедленная закалка в масло.

Выдавленные заготовки подвергают двукратному отпуску при температуре 560 °С продолжительностью по 1 ч и криогенной обработке в жидком азоте в течение 30 мин по режиму, приведенному в табл. 5. В результате такой обработки профильная заготовка инструмента имеет поверхностный упрочненный и износостойкий слой глубиной 2,1-2,3 мм по вершине зуба, твердостью 66-68 $HRC_Э$ с припуском под шлифование. Износостойкость зенкеров и разверток, обработанных указанным способом, в 1,5-2 раза выше по сравнению с инструментом, изготовленным другими способами. Деформация в режиме ВТМО способствует формированию однородной дисперсной структуры металла с аустенитным зерном 12-13-го балла и карбидной неоднородностью 1-2-го балла.

Использование этого способа обеспечивает снижение расхода инструментальных сталей.

Цементация в пасте. При единичном и мелкосерийном производстве применяют цементацию в пасте, позволяющую сократить продолжительность процесса. Составы паст приведены в табл. 6.

Для приготовления паст исходные материалы просеивают и взвешивают в нужной пропорции, затем ссыпают в смеситель и тщательно перемешивают. Жидкие составляющие (масло, мазут, керосин) вводят при непрерывном перемешивании. Паста должна иметь сметанообразную консистенцию. Для получения равномерной глубины цементованного слоя пасту необходимо наносить на поверхность детали ровным слоем, толщина которого приблизительно в 5-8 раз больше требуемой глубины цементованного слоя. Перед покрытием пастой детали тщательно очищают от окалины, продуктов коррозии, грязи и т. п., в противном случае паста плохо удерживается на поверхности.

Детали, покрытые слоем пасты, загружают в ящики. Кромки крышек ящиков тщательно промазывают огнеупорной глиной. Цементацию проводят при температуре 910-950 °С. Продолжительность цементации при температуре 950 °С по сравнению с цементацией в твердом карбюризаторе при 910 °С сокращается в 5-6 раз. Содержание углерода в цементованном слое достигает 1,0-1,2%; твердость после закалки превышает 60 HRC. После цементации детали охлаждают на воздухе, затем осуществляют закалку. В целях экономии времени и сокращения числа подогревов закалку деталей целесообразно проводить непосредственно после извлечения их из цементационного ящика, температура которого на воздухе снижается до температуры закалки.

6. Составы паст, применяемых для цементации стали

Номер состава	Компонент	Содержание компонента, %
1	Газовая сажа Кальцинированная сода Железосинеродистый калий Веретенное масло (отработанное)	28 3,5 1,5 67
2	Голландская сажа Кальцинированная сода Декстрин Индустриальное масло (отработанное)	30 10 20 40
3	Голландская сажа Кальцинированная сода Щавелево-кислый натрий	55 30 15
4	Ацетиленовая сажа Кальцинированная сода Декстрин Мазут	30 20 10 40
5	Древесноугольная пыль Кальцинированная сода Железосинеродистый калий Декстрин	75 5 10 10
6	Ацетиленовая сажа Кальцинированная сода Железосинеродистый калий Декстрин	60 30 5 5
7	Голландская сажа Кальцинированная сода Железосинеродистый калий Декстрин	70 10 10 10

7. Состав ванн для цементации в жидкой среде

Номер состава	Компонент	Содержание компонента, %
1	Кальцинированная сода Поваренная соль Карбид кремния	83-84 8-10 7-8
2	Кальцинированная сода Поваренная соль Хлористый аммоний Карбид кремния	78-81 5-6 6-8 7-8

Контроль качества деталей осуществляют по образцам-свидетелям.

Цементация в жидкой среде. Этот процесс осуществляют для обработки деталей небольших размеров в ваннах расплавами солей. Применяемые составы приведены в табл. 7.

Предварительно очищенные и подогретые до 300-400 °С детали загружают в соляную ванну в сетчатом ковше. Рабочая температура расплава 850-870 °С; скорость цементации в пастах: состав 1 – 0,25-0,35 мм/ч, состав 2 – 0,45-0,55 мм/ч; достигаемая глубина цементации 0,1-0,5 мм.

Газовая цементация осуществляется в муфельных шахтных электропечах. Для образования газообразной среды в качестве карбюризаторов используют жидкости – бензол, синтин, керосин, пиробензол, индустриальное и трансформаторное масло или газы – природный и попутный, нефтяных месторождений, пропанобутановые смеси. В шахтные печи с вентиляторами жидкие карбюризаторы подают в виде капель или в пылевидном состоянии через форсунки, соединенные с двух- или четырехплунжерным насосами. Расход различных карбюризаторов приведен в табл. 8, глубина цементованного слоя при различном времени выдержки – в табл. 9.

При частичной цементации поверхности детали, не подлежащие обработке, следует изолировать от атмосферы печи с помощью защитных обмазок, составы которых приведены в табл. 10. Очищенные детали, уложенные в корзину или в специальные приспособления, загружают в печь на расстоянии 5-10 мм друг от друга. Продолжительность нагрева зависит от типоразмера печи и колеблется в пределах 1-4 ч. Скорость нагрева определяют с помощью данных, приведенных в табл. 11. Заданную глубину цементованного слоя получают подбором температуры процесса. Рабочая температура цементации составляет: при обычном режиме 900-940 °С; при высокотемпературном 970-1100 °С. Влияние температуры t на глубину цементации δ при выдержке в течение 3 ч и использовании различных карбюризаторов показано на рис. 17.

Охлаждение деталей после газовой цементации осуществляют в колодцах, на воздухе или в закалочных средах (при непосредственной закалке). Скорость охлаждения выбирают такой, чтобы обеспечивались минимальное коробление, отсутствие трещин, карбидной сетки и, в случае необходимости, возможность механической обработки.

8. Расход карбюризатора при газовой цементации

$V_{р.пр}$	Q_x при цементации на глубину 1 мм, кг/ч	Расход карбюризатора					
		Жидкого (керосин, пиробензол, синтин), капель/мин			Газообразного (природный газ), м³/ч		
		При нагреве	При выдержке	На 1 м³ рабочего пространства, л/ч	При нагреве	При выдержке	На 1 м³ рабочего пространства, л/ч
0,04	100	25-35	60-70	4,50	-	-	-
0,08	150	35-45	60-90	2,50	0,3-0,5	0,9-1,2	13,0
0,14	220	35-45	70-90	1,50	0,3-0,5	0,9-1,2	7,5
0,25	440	50-75	120-150	1,47	0,4-0,6	1,2-1,6	5,6
0,35	600	50-75	120-150	1,05	0,4-0,6	1,2-1,6	4,0
0,85	1500	60-80	150-170	0,52	0,4-0,6	1,2-1,8	1,78
0,03	50	25-35	40-60	4,50	-	-	-
0,10	150	35-45	60-90	2,10	0,3-0,5	0,9-1,2	10,0
0,14	220	35-45	70-90	1,50	0,3-0,5	0,9-1,2	7,5
0,34	600	50-75	120-150	1,10	0,4-0,6	1,2-1,6	4,1
2,80	-	-	2,0-2,5	0,80	-	4,0-6	1,8
37,0	-	-	-	-	-	4,0-8	1,2

Примечания. 1. $V_{р.пр}$ и Q_x – объем рабочего пространства и средняя часовая производительность печи.
2. Принято, что в 1 см³ жидкого карбюризатора содержится в среднем 23 капли.

9. Глубина цементованного слоя при температуре цементации 930 °С (без учета времени прогрева) в зависимости от продолжительности выдержки

Глубина слоя, мм	Продолжительность (ч) цементации в карбюризаторе					
	Керосин	Бензол	Пиробензол	Масло		Синтин
				Трансформаторное	Индустриальное 20	
От 0,7 до 1,0	5-7	-	4-6	4-6	7-9	3-4
Св. 1,0 » 1,3	7-9	8-10	6-8	5-8	10-12	5-6
» 1,3 » 1,6	9-11	10-12	8-10	8-10	12-14	6-8
» 1,6 » 1,9	11-13	13-15	10-12	10-12	14-17	9-10
» 1,9 » 2,5	13-15	15-18	-	13-15	-	-

10. Составы защитных обмазок при газовой цементации

Номер состава	Компонент	Содержание компонента, % (мас. доля)	Примечание
1	Маршаллит Бура Тальк	85-90 1,5-2,0 10-15	Разводят на жидком стекле
2а	Хромовокислый кальций Кальцинированная сода Поташ Жидкое стекло	12 7 4 77	Составы 2а и 2б приготовляют отдельно и смешивают в соотношении 1:1
2б	Маршаллит Каолит	80 20	
3	Песок Глина Бура Нитрит натрия	44 40 13 3	Разводят на жидком стекле и наносят в два слоя
4	Тальк Каолин	70 30	Разводят на жидком стекле
5	Асбестовый порошок Жидкое стекло	35 65	Хранят не более 2 ч с момента приготовления
6	Свинцовый сурик Окись алюминия Тальк Жидкое стекло	4 8 16 72	Наносят в два слоя. Обмазка пригодна при высокотемпературной цементации
7	Окись меди Тальк Жидкое стекло	30 20 50	Наносят в два слоя

Метод газовой цементации применяют и для упрочнения инструментов, изготовленных из твердых сплавов и быстрорежущих сталей. За 3-5 ч цементации при температуре 1000-1100 °С получают диффузионный слой толщиной 3-7 мкм, состоящий из монокарбидов Ti, V, Nb, Cr, Mo, W и сложных карбидов Ti-Nb, Ti-Cr, Nb-Cr и др. Газовую цементацию используют для повышения эксплуатационной стойкости ковочных штампов, изготовленных из сложнолегиро-

11. Средние значения скоростей газовой цементации при различных температурах процесса

Глубина слоя, мм	Скорость (мм/ч) при температуре, °С				
	900	925	950	975	1000
До 0,5	0,45	0,55	0,75	-	-
0,5-1,0	0,30	0,40	0,55	0,75	0,95
1,0-1,5	0,20	0,30	0,40	0,55	0,75
1,5-2,0	0,15	0,20	0,25	0,35	0,55
2,0-2,5	0,12	0,15	0,20	0,25	0,40

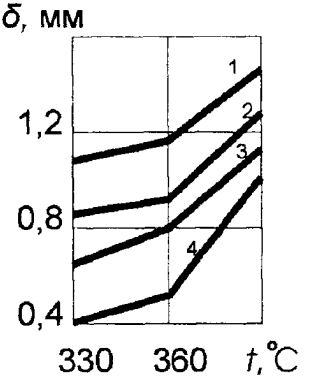


Рис. 17. Влияние температуры на глубину цементации при использовании различных карбюризаторов: 1 — синтина; 2 — керосина; 3 — уайт-спирита; 4 — индустриального масла

ванных сталей, обладающих эффектом вторичной твердости (например, сталь состава, %: С 0,36; Si 1,1; Cr 5,3; W 1,3; Mo 1,5; V 0,3). Инструмент подвергают нагреву сначала при температуре до 590 °С, затем при температуре до 850 °С в камере в атмосфере эндогаза и цементации при 1020 °С в течение 0,5-3 ч в атмосфере эндогаза, обогащенного метаном. Охлаждение (закалку) после цементации проводят в эндогазе, после чего выполняют трехкратный отпуск при 560 °С с выдержкой 1 ч на каждые 200 мм сечения. Получают цементованный слой глубиной до 0,75 мм с твердостью поверхности 650 HV; содержание С в верхней части слоя 0,7%, в средней – 0,5%. Стойкость цементованных и закаленных штампов при изготовлении клапанов возрастает в этом случае до 4000-5000 шт. (против 1800-2500 шт. для обычных штампов); при изготовлении шпинделей стойкость возрастала до 5500-6000 шт. (против 4000-4500 шт.). Цементация может быть применена и для штампов из других Cr-Mo-V- и Cr-Mo-W-содержащих сталей.

Насыщение углеродом и азотом

Низкотемпературная нитроцементация – обработка, которой подвергают технологическую оснастку, изготовленную из быстрорежущей стали всех марок, для одновременного насыщения поверхностного слоя азотом и углеродом, образующимися в результате разложения жидкого цианизатора (триэтаноламина $(C_5H_5O)_3N$), жидкого или газообразного карбюризатора и аммиака при их одновременной подаче в печь. В качестве жидких карбюризаторов применяют керосин,

легкое индустриальное масло, пиробензол; в качестве газообразных – природный газ и газ, используемый для бытовых нужд. Составы карбюризаторов и атмосферы печей при низкотемпературной нитроцементации приведены в табл. 12.

Низкотемпературная нитроцементация повышает твердость поверхности изделий, сопротивление износу и задиру, обеспечивает хорошую прирабатываемость и высокую износостойкость. При низкотемпературной нитроцементации инструмента из быстрорежущих сталей за 1-4 ч происходит образование диффузионного слоя глубиной 0,03-0,08 мм с содержанием углерода 0,96-1,02% и азота 0,15-0,30%. Слой имеет высокую твердость и износостойкость. Хрупкого слоя, содержащего избыточную ε-фазу, на поверхности инструмента не образуется. Поверхность приобретает матовый, синеватый цвет. Нитроцементацию проводят в шахтных муфельных электропечах или в камерных электропечах после обработки резанием и термической. Инструмент не должен иметь прижогов, заусенцев и других дефектов на поверхности режущих кромок. Твердость инструментов перед нитроцементацией должна быть не менее 61 HRC.

Подготовка к нитроцементации заключается в очистке и обезжиривании поверхностей деталей. Для этого их тщательно протирают и промывают в бензине или 5%-ном растворе каустической соды (едкого натра), нагретом до 80-90 °С, в течение 10-15 мин. После промывки детали насухо протирают и устанавливают в приспособлении или укладывают в корзины с соблюдением зазоров, необходимых для свободной циркуляции газов.

Приспособления с нитроцементуемыми деталями загружают в печь после того, как в ней будет достигнута рабочая температура, равная температуре предшествовавшего отпуска (для инструментов из быстрорежущей стали 550-560 °С,

12. Составы карбюризаторов и атмосфер печей при нитроцементации

Состав карбюризатора, % (мас. доля)					Температура печи, °С
$(C_3H_4OH_3)N$	NH_4OH	$NaNO_3$	$NaAlO_2$	H_2O	
94,5	0,5	0,3	0,3	4,4	550
94,5	0,5	0,3	0,3	4,4	560
95,3	0,5	0,4	0,2	3,6	560

Расход карбюризатора, капели / мин	Точка росы	Состав атмосферы печи *, % (мас. доля)					
		CO	CH_4	NH_3	H_2	CO_2	O_2
50 / 60	−2÷+1	26–27	3,0–3,2	7–8	28–30	0,60	0,3
55 / 65	−3÷+6	28–30	3,5–4,3	6–9	28–32	0,30	0,2
60 / 70	−3÷+7	27–29	3,4–3,8	8–11	24–27	0,60	0,5

* Остальное – азот.

Примечание. В числителе дроби – расход карбюризатора в печи Ц-25; в знаменателе – в печи Ц-75.

для инструментов из высокохромистых сталей типа Х12 и Х12Ф1 510-520 °С). Карбюризатор подают при закрытой крышке печи. В период прогрева печи до рабочей температуры в нее вводят примерно 30-40% объема карбюризатора. Остальное количество карбюризатора (60-70%) расходуют равномерно в течение всего периода выдержки деталей в печи. При осуществлении такого режима нитроцементации глубина слоя составляет 0,02-0,05 мм.

На рис. 18 показана зависимость глубины нитроцементованного слоя от температуры процесса. Продолжительность низкотемпературной нитроцементации дана в табл. 13; средняя скорость нитроцементации – в табл. 14; режимы высокотемпературной нитроцементации – в табл. 15. Продолжительность выдержки устанавливают в зависимости от конфигурации и размеров поперечного сечения деталей. В табл. 16 дана продолжительность выдержки с момента достижения рабочей температуры 550-560 °С при нитроцементации инструмента из быстрорежущей стали (например, инструментов).

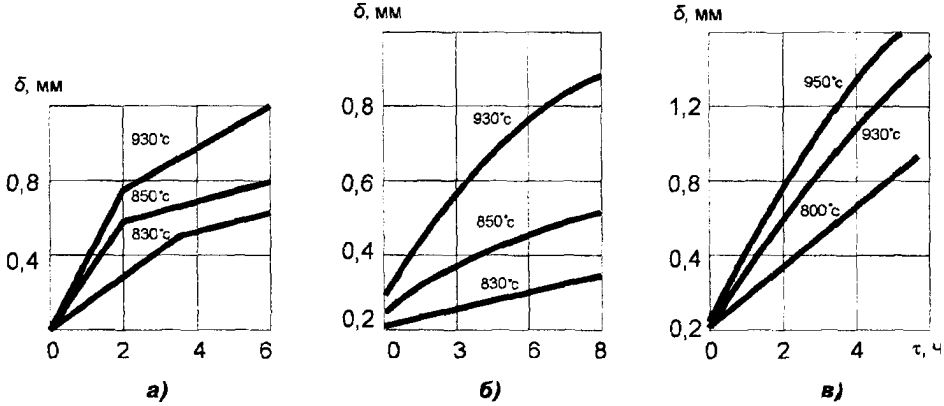


Рис. 18. Зависимость глубины нитроцементованного слоя от температуры процесса и времени выдержки при использовании различных карбюризаторов: *а* – триэтаноламина; *б* – пиробензола и аммиака; *в* – индустриального масла и аммиака

13. Продолжительность низкотемпературной нитроцементации при 570 °С

Нитроцементующая среда	Продолжительность процесса, ч
Эндогаз (40% H_2, 20% CO, 40% N_2) + 25% аммиака	0,5-3
Экзо- и эндогаз (20% H_2, 20% CO, 60% N_2) + 50% аммиака	
Экзогаз (90% N_2, 10% CO_2) + 50% аммиака, 50% продуктов пиролиза керосина, спирта или синтина + 50% аммиака	1-6

Примечания. 1. Применение эндогаза при температуре ниже 700 °С может вызвать взрыв. Для предотвращения взрыва рекомендуется следующая технология: у передней дверцы создается пламенный затвор, печь нагревают до 800 °С, подают при этой температуре эндогаз и аммиак, далее снижают температуру до 620 °С, печь постоянно продувают газом, загружают детали и выполняют процесс при 570 °С.

2. По окончании процесса нитроцементации проводят ускоренное охлаждение в светлокалящем масле или потоке защитного газа.

14. Средняя скорость (мм/ч) нитроцементации при различных температурах процесса

Глубина слоя, мм	Средняя скорость процесса при температуре, °С		
	860	930	950
До 0,5	0,20	0,40	0,50
0,5 – 1,0	0,15	0,30	0,40
1,0 – 1,5	0,12	0,20	0,30

15. Режимы высокотемпературной нитроцементации стали

Нитроцементующая среда	Температура среды, °С	Глубина слоя, мм	Примечание
Эндогаз (20% CO, 40% H_2, 40% N_2), 3-5% природного газа, 3-5% аммиака *1	860	0,25-1,0	Процесс осуществляют в безмуфельных методических печах. Углеродный потенциал регулируется по точке росы или содержанию CO_2. Приборы для регулирования потенциала азота не разработаны.
Маловодородный екзоэндогаз (20% CO, 20% H_2, 60% N_2), 0,5-0,8% природного газа, 2-4% аммиака	860	0,5-0,8	То же. Применение маловодородной эндотермической атмосферы менее пожароопасно, а также устраняет возможность возникновения водородной хрупкости
Маловодородный эндогаз, 1,5% природного газа, 4-6% аммиака	820-860	0,2-0,5	
Природный газ, 20-25% аммиака	860	0,6-0,9	Процесс ведется в вертикальных печах типа Ц.
Триэтаноламин, 10% воды	860-930	0,2-1,0 0,8-1,5	Процесс осуществляется в вертикальных и ретортных шнековых печах. Дозированную подачу триэтаноламина в печь осуществляют с помощью топливного насоса.
Синтин, керосин, спирт и т.п., 5-50% аммиака общего объема *2	860-930	0,4-1,5	Процесс ведется в вертикальных печах

*1 Из-за отсутствия приборов автоматического регулирования азота подача аммиака в атмосферу печи должна строго регулироваться обслуживающим персоналом.

*2 Рекомендуется: подавать в печи азот для лучшей циркуляции газа в рабочем объеме печи; в печь Ц-60 вводить смесь, состоящую из 43-49 % керосина (0,5 л/мин), 14-17 % аммиака (2,0 $см^3$/мин) и 34-43 % технического азота (150 $см^3$/мин).

По окончании выдачи прекращается подача аммиака, а затем и карбюризатора. Печь выключают, а после того, как погаснет факел отходящих газов, крышку открывают и детали (инструменты) выгружают из муфеля.

При изготовлении специального инструмента из стали Р6М5 рационально осуществлять карбидизацию по следующей технологии. Фильеры, центры для шлифования, матрицы и пуансоны для вырубки листовых заготовок после обработки резанием с припуском до 0,15 мм на сторону загружают в печь Ц-25, разогретую до 940 °С, и подают карбюризатор (80 капель/мин в первые 30 мин и 100-110 капель/мин во время выдержки в течение 6-10 ч); по окончании карбидизации садку охлаждают в масле, загружают ее на отпуск сначала при температуре 120-140°С, затем при температуре 200-220 °С в течение 6 ч и охлаждают на

16. Продолжительность выдержки при нитроцементации инструментов из быстрорежущей стали

Инструмент	Диаметр или толщина, мм	Выдержка, ч
Сверла, зенкеры, развертки	До 15	1,0-1,5
	Св. 15 до 25	1,5-2,0
	» 25 » 50	2,0-3,0
Метчики	До 15	0,5-1,0
	Св. 15 до 25	1,0-1,5
	» 25 » 50	1,5-2,0
Фрезы:		
резьбовые с шлифованными зубьями	25-50	1,0-1,5
	Св. 50	1,5-2,0
то же, но с нешлифованными зубьями	25-50	1,5-2,0
	Св. 50	2,0-2,5
червячные и шлицевые с шлифованными зубьями	50-75	1,0-1,5
	Св. 75	1,5-2,0
то же, но с нешлифованными зубьями	50-75	1,5-2,0
	Св. 75	2,0-2,5
цилиндрические, фасонные и торцовые	До 50 Св.	1,0-1,5
	50 до 75	1,5-2,0
	» 75	2,0-2,5
Резцы:		
дисковые	До 10	1,0-1,5
	Св. 10	1,5-2,0
круглые	До 5	1,0-1,5
	Св. 5 до 15	1,5-2,0
тангенциальные	10	1,5
	25	2,0

воздухе; затачивают инструмент, замеряют твердость по Виккерсу (950-980 HV 30/30); шлифуют, доводят, подвергают промежуточному отпуску при температуре 180 °С в течение 6 ч.

Дисковые резцы, матрицы для холодной высадки, развертки карбидизируют по аналогичному режиму, охлаждают на воздухе, проводят высокий отпуск при 700 °С в течение 4 ч. Затем проводят закалку с подогревом до 840 °С в течение 20 мин и нагревом до 1120-1140 °С (8-10 мин) в масле. После трехкратного отпуска при температуре 520 °С в течение 2 ч измеряют твердость (96-107 HV 50) и проводят заточку с промежуточным отпуском при температуре 500 °С в течение 2 ч.

Газовая карбидизация в продуктах пиролиза триэтаноламина с активизирующими добавками для повышения твердости специального инструмента из стали типа Р6М5 экономична, позволяет повысить износостойкость фильер, матриц, пуансонов по сравнению с аналогичной оснасткой из стали типа Х12М в 2-4 раза или до уровня твердосплавных из сплавов марок ВКЮ, ВК20.

Для инструментов, прошедших нитроцементацию, применяют следующие виды контроля: наружный осмотр для выявления видимых следов окисления, бурого налета, закоксовывания, а также забоин, сколов и др.; выборочный контроль твердости с помощью приборов Виккерса либо Супер-Роквелла и проверка хрупкости слоя с помощью прибора Роквелла (проверка ведется по образцам-свидетелям, изготовленным из той же стали, что и инструменты, и прошедшим термическую обработку и нитроцементацию вместе с инструментами); контроль

состава газов в печи путем химического анализа проб отходящих газов; контроль расхода газа с помощью реометров; контроль расхода жидких карбюризаторов, а также триэтаноламина измерением мензуркой подачи в единицу времени.

Для интенсификации процесса насыщения и повышения износостойкости диффузионного слоя в карбюризатор, содержащий триэтаноламин и воду, дополнительно вводят уксуснокислый аммоний и азотнокислый никель [а. с. 740863 (СССР)] в следующем соотношении, %: уксуснокислый аммоний 2,5-6,0; азотнокислый аммоний 3,0-10,0; азотнокислый никель 0,5-1,2; сода 1,0-12,0; триэтаноламин – остальное. Введение в триэтаноламин азотнокислого и уксуснокислого аммония снижает температуру разложения основного компонента (триэтаноламина) до 490-500 °С. Скорость и полнота пиролиза, определяемого по выходу активных газов, повышается на 30-80%. Образующиеся частицы оксида никеля оказывают влияние на связывание водорода в молекулы, что предотвращает возникновение повышенной хрупкости в поверхностном слое. Карбюризатор готовят последовательным введением в чистый триэтаноламин насыщенных водных растворов азотнокислого аммония NH_4NO_3, уксуснокислого аммония CH_3COONH_4 и азотнокислого никеля $Ni(NO_3)$.

Азотнокислый аммоний приготовляют растворением в воде при нормальной температуре 1780-1800 г/л химически чистого NH_4NO_3; в виде водных растворов вводят уксуснокислый аммоний (содержание в растворе 1400-1480 г/л) и азотнокислый никель (содержание в растворе 2300-2350 г/л). Максимальное количество воды, вводимое с насыщенными водными растворами, не должно превышать 12%.

Пример. Зенкеры из стали Р9К5, имеющие после закалки и отпуска 65,5 HRC, подвергают нитроцементации при температуре 570 °С в течение 3 ч в печи Ц-25. Состав карбюризатора, %: уксуснокислый аммоний 6,0; азотнокислый аммоний 10; азотнокислый никель 1,2; вода 7,5; триэтаноламин – остальное.

Расход карбюризатора в первые 20 мин составляет 138 $см^3$/ч, в дальнейшем – 156 $см^3$/ч. Охлаждение проводят на воздухе. Скорость насыщения составляет 0,03 мм/ч против 0,015 мм/ч в других карбюризаторах. Получают слой глубиной 0,101 мм с микротвердостью 1007 HV 50, в то время как при обработке в других карбюризаторах глубина слоя не превышает 0,056 мм. Износостойкость слоя повысилась в 1,5 раза.

Карбюризатор обеспечивает повышение скорости образования слоя с оптимальным соотношением азота и углерода в 1,5-1,7 раза. Износостойкость инструмента повышается в 1,4-2 раза. Слои не склонны к выкрашиванию при ударных нагрузках и при значительных толщинах (0,2-0,25 мм). Карбюризатор прост в приготовлении, не содержит дефицитных и токсичных компонентов, не образует сажистых смолистых соединений в печах и системах отвода газообразных продуктов из печей.

Нитроцементацию в твердых смесях применяют преимущественно для повышения работоспособности инструментов из быстрорежущих сталей. Рабочая смесь, %: древесного угля 60-80 и желтой кровяной соли 20-40, либо животного угля 20-40, древесного угля 40-60 и желтой кровяной соли 20-25. Составляющие смеси дробят, просеивают и тщательно перемешивают. Поперечный размер кусочка угля не должен превышать 1-3 мм. Смесь просушивают при температуре 100-120 °С. Предварительно очищенные детали упаковывают в металлические ящики, пересыпая их смесью. Ящики устанавливают в печь и выдерживают при температуре 550-560 °С в течение 2-3 ч. Затем ящики выгружают из печи, охлаждают до

200-100 °С и распаковывают. Охлаждение ящиков до нормальной температуры приводит к слипанию смеси, что затрудняет распаковку и очистку. При указанной выдержке глубина нитроцементованного слоя достигает 0,015-0,055 мм.

Нитроцементация пастами. Состав пасты, %: желтой кровяной соли 16,7; карбюризатора 21,5; углекислого натрия 4,2; карборунда 3,8; цемента 0,9 и жидкого стекла 52,9. Пасту в сметанообразном состоянии наносят на обрабатываемую деталь, предварительно подогретую до 300 °С. Карборунд и цемент способствуют быстрому затвердеванию пасты на воздухе, препятствуют стеканию солей при нагреве детали до температуры обработки. Поверх слоя пасты наносят смесь из 60% кварца и 40% жидкого стекла и погружают в 30%-ный водный раствор аммиака. При последующем нагреве ТВЧ смесь превращается в керамическую оболочку. Для нитроцементации нагрев проводят ТВЧ до температуры 1200 °С. За 2 мин глубина слоя достигает примерно 1 мм. Метод удобен при производстве зубчатых колес, дисков, муфт, кулачков и других подобных деталей, изготовляемых из конструкционных сталей.

Цементация литого инструмента из быстрорежущих сталей. Существенный недостаток литых инструментов из быстрорежущих сталей – повышенная хрупкость из-за наличия в структуре стали карбидной эвтектики. Повышение износостойкости такого инструмента может быть достигнуто обезуглероживанием поверхностного слоя металла и последующей его *высокотемпературной цементацией* [а. с. 850703 (СССР)]. Способ включает гомогенизирующую обработку, закалку и отпуск. *Гомогенизирующую обработку* проводят двухступенчато при температурах 1270-1280 °С и 1310-1320 °С в обезуглероживающей атмосфере, а затем осуществляют высокотемпературную цементацию. Обезуглероживание при температуре 1270-1280 °С обеспечивает получение низкоуглеродистой оболочки, необходимой для предотвращения роста расплавленной эвтектики, которая образуется при температуре 1310-1320 °С. За сравнительно короткое время получают слой феррита в 2-3 мм. В нем эвтектические карбиды полностью отсутствуют.

Последующее науглероживание обезуглероженной поверхности (например, высокотемпературная цементация) позволяет получить в поверхностном слое структуру с мелкозернистыми равномерно распределенными карбидами, обеспечивающую после окончательной термической обработки высокие режущие свойства и износостойкость литого режущего инструмента из быстрорежущей стали.

Пример. Заготовки размером 10×100×60 мм из быстрорежущей стали Р6М5, полученные методом точного литья, нагревают до 1270 °С и обезуглероживают в среде влажного водорода в течение 1 ч. Затем повышают температуру до 1310 °С и выдерживают при этой температуре в течение 2 ч. Последующее охлаждение со скоростью 15 °С/с. В результате на поверхности заготовок образуется слой феррита толщиной 3 мм. Обезуглероженные заготовки подвергают высокотемпературной цементации в стандартном твердом карбюризаторе при температуре 1150 °С с выдержкой в течение 2 ч. Охлаждение до 850 °С ведут с печью. Выдерживают при этой температуре 2 ч и окончательно охлаждают с печью. В результате высокотемпературной цементации в обезуглероженном поверхностном слое образуется структура с мелко дисперсными равномерно распределенными карбидами.

После химико-термической обработки проводится окончательная термическая обработка по режиму, соответствующему термической обработке быстрорежущей стали Р6М5. Величина и темп изнашивания резцов из этой стали, обработанных по описанному способу, значительно меньше, чем у резцов, изготовленных из литой быстрорежущей стали. Способ обеспечивает получение поверхностного слоя с мел-

кодисперсными равномерно распределенными карбидами, что значительно повышает режущие свойства и износостойкость литого режущего инструмента из быстрорежущей стали.

Диффузионное насыщение инструментов, изготовленных из быстрорежущих сталей, карбидами металлов непосредственно в процессе резания можно осуществить описанным ниже способом [а. с. 722999 (СССР)]. Известно, что в результате заточек, которым подвергаются инструменты после химико-термической обработки, происходит частичное обезуглероживание режущих кромок и отпуск затачиваемых поверхностей, что приводит к снижению их твердости.

Способ повышения износостойкости режущих инструментов непосредственно при их эксплуатации включает в себя нагрев и диффузионное насыщение металла инструмента в полимерсодержащей среде. Нагрев осуществляют обработкой резанием, а насыщение – подачей полимерсодержащей среды в зону резания. В качестве такой среды используют 10%-ную суспензию полиэтилена низкого давления (ГОСТ 16338-77) в 5%-ной водной эмульсии эмульсола ЭТ-2.

Обработку резанием в полимерсодержащей среде осуществляют в течение 2-3 мин при ужесточении режимов резания на 20-30% по сравнению с обычно принятой технологией, что необходимо для создания в зоне обработки энергетических условий, обеспечивающих, с одной стороны, эффективную термомеханодеструкцию полимерного компонента среды до образования активного атомарного углерода, а с другой стороны, – высокую температуру и ингредиент механических напряжений на режущих кромках инструмента. При резании в полимерсодержащей среде происходит науглероживание инструмента. Высокая температура в зоне резания способствует деструкции полимера, содержащегося в среде, с последующим образованием активного углерода. Это значительно ускоряет его диффузию в металл инструмента. Содержание углерода в процессе такой обработки в полимерсодержащей среде увеличивается на 0,4-0,5%. Наличие высокой концентрации активного углерода в зоне резания и ювенильных (свободных от оксидов) поверхностей способствует дополнительному образованию мелкодисперсных карбидов типа Fe_3W_3C.

Пример. Сверла из стали Р6М5, диаметром 25 мм, при сверлении стали 40Х перед проведением сравнительных испытаний на износостойкость эксплуатировались в 10%-ной суспензии полиэтилена низкого давления и 5%-ной водной эмульсии эмульсола ЭТ-2 в течение 2-3 мин при следующих режимах: скорость 39,2 м/мин, подача 0,28 мм/об, глубина сверления 100 мм.

Сравнительные испытания проводили с использованием в качестве смазочно-охлаждающей жидкости 5%-ной водной эмульсии эмульсона ЭТ – 2. Режим сверления: скорость 27,9 м/мин, подача 0,28 мм/об, глубина сверления 100 мм. Стойкость инструмента фиксировалась по достижении износа задней поверхности, равного 1 мм. В результате, в среднем для партии из 10 сверл, упрочненных описанным способом, характерно повышение стойкости в 5-6 раз по сравнению со стойкостью стандартных сверл.

Способ позволяет повысить производительность труда за счет экономии времени на смену и заточку инструмента, проводить упрочнение инструмента непосредственно на рабочем месте, без дополнительного оборудования. Достигается экономия дорогостоящих инструментальных сталей, идущих на изготовление режущих инструментов.

Карбонитрирование – одно из перспективных направлений увеличения стойкости быстрорежущего инструмента, состоящее в термодиффузионном насыщении поверхности инструмента азотом и углеродом *(жидкое азотирование)*. Значительный эффект получается при карбонитрировании зубчатых колес, кулачков, резьбовых соединений из ферромагнитных конструкционных сталей и др.

Насыщение поверхностных слоев инструмента углеродом, азотом, серой или несколькими элементами одновременно повышает его твердость, износостойкость, сопротивление усталости и соответственно стойкость. Однако применяемые в настоящее время способы химико-термической обработки имеют ряд недостатков.

Так, процесс *цианирования* с использованием цианидов натрия (NaCN) и калия (KCN) не находит широкого применения из-за высокой токсичности. Газовое азотирование инструмента – очень длительный процесс. Например, для обработки этим способом крупногабаритных штампов необходимо 36-40 ч. Поэтому перспективным является процесс низкотемпературного *жидкостного азотирования*, осуществляемый с применением неядовитых солей – цианатов и карбонатов.

Процесс основан на насыщении поверхности азотом и углеродом (карбонитрирование) в расплавах солей типов KCNO (80-85% KCNO и 15-20% K_2CO_3) и NaCNO при температуре 540-560 °С. Наиболее часто используют расплав, состоящий из 25-38% NaCNO (получаемого сплавлением мочевины и кальцинированной соды в соотношении 1,3 : 1), 25-35% Na_2CO_3 и 28-40% KCl. Карбонитрированию подвергают режущий инструмент (как новый, так и восстановленный), изготовленный из всех марок быстрорежущей стали, после окончательной термической (закалка, отпуск) обработки и обработки резанием (шлифование, заточка, полирование). Инструмент для карбонитрирования должен быть очищенным от грязи, обезжиренным, без каких-либо защитных, оксидных или других покрытий.

Подогрев инструмента в воздушной атмосфере проводят в течение 10-15 мин при температуре 300-350 °С. Для ведения процесса карбонитрирования используют печь-ванну, снабженную системой вентиляции. Агрегат состоит из бака для обезжиривания, печи с воздушной атмосферой для подогрева, печи-ванны с температурой нагрева до 600 °С, ванны для оксидирования (воронения) при температуре до 140 °С, ванны (бака) для удаления соли с поверхности инструмента. Основные технологические операции процесса карбонитрирования приведены в табл. 17. Карбонитрирование инструмента проводят при температурах: 560 °С быстрорежущих сталей марок Р18, Р9К10 и Р12; 550 °С марок Р9 и Р6М5; 540 °С легированных сталей марок Х12М, Х12Ф и Х12. Продолжительность карбонитрирования инструмента в ванне при указанной температуре приведена в табл. 18.

Максимальное значение микротвердости 1316 HV получают при температуре ванны 550-570 °С независимо от времени выдержки. При температуре 580 °С такая микротвердость может быть достигнута только при выдержке 25-30 мин. Твердость сердцевины во всех случаях превышает 600 единиц.

При карбонитрировании добиваются не только высокой поверхностной твердости инструмента, но и плавного ее изменения от поверхности к сердцевине, предотвращающее скалывание диффузионного слоя. Оптимальные режимы карбонитрирования быстрорежущих сталей следующие: температура 560 °С и выдержка при этой температуре 20-25 мин. При этом режиме получают диффузионный слой достаточной толщины с максимальной микротвердостью 1316 HV. Оптимальная глубина карбонитридного слоя для режущего инструмента 20-30 мкм, микротвердость слоя 970-1200 HV.

17. Операции технологического процесса карбонитрирования быстрорежущих сталей

Операция	Среда, условия проведения операции
Обезжиривание	Горячий 3%-ный раствор
Подогрев	Температура нагрева 300-350 °С
Нагрев для карбонитрирования	Соляная ванна, продувка воздухом с целью нагрева до температуры 540-560 °С
Охлаждение	На воздухе до 150 °С, перенос в расплав NaOH – $NaNO_2$ – $NaNO_3$
Оксидирование	Раствор NaOH – KNO_2 при 140 °С в течение 20-30 мин; стабилизация при температуре 300 °С
Промывка	Горячая вода Эмульсол: 5%-ный раствор Э2, или ЭТ2, или НГЛ-205
Сушка	На воздухе

18. Продолжительность карбонитрирования инструмента основных видов

Инструмент	Размер инструмента, мм	Время выдержки в ванне, мин	Глубина карбонитридного слоя, мкм
Сверла	*Диаметр* 7-10 10-20 20-30 Св. 30	 15-20 20-25 25-30 30-45	 10-15 15-20 20-30 20-30
Развертки, зенкеры, метчики	7-10 10-20 20-30 Св. 30	15-20 20-25 25-30 25-40	10-15 15-20 20-30 15-20
Фрезы: резьбовые концевые насадные	 До 35 35-50 Св. 50	 20-25 25-30 35-45	 10-15 10-15 10-15
Борфрезы	7-10 10-20 20-30 Св. 30	15-20 20-25 25-30 30-45	10-15 10-15 10-15 15-20
Дисковые фрезы (толщина)	*Толщина* 1-2 2-5 5-10 10-15 Св. 15	 10-15 15-20 20-25 25-30 20-45	 7-10 10-15 10-15 10-15 10-15
Цилиндрические фрезы	*Диаметр* До 25 25-40 40-60 Св. 60	 10-15 25-30 30-40 50-60	 10-15 10-15 10-15 10-15

Продолжение табл. 18

Инструмент	Размер инструмента, мм	Время выдержки в ванне, мин	Глубина карбонитридного слоя, мкм
Червячные шлицевые фрезы	50-60 Св. 60	25-30 30-45	20-30 20-30
Круглые гребенки	*Все размеры*	30-40	15-20
Токарные и строгальные резцы	*Толщина* 6 × 10 8 × 12 10 × 16 16 × 24 20 × 30 30 × 45	 15-20 20-25 25-30 30-35 35-40 40-45	 10-15 10-15 15-20 15-20 20-30 20-30
Пресс-формы для литья под давлением (сталь 3Х2В8)	*Все размеры*	120-150	80-150
Знаки для пресс-форм (сталь 3Х2В8Ф)	*Толщина* До 25 Св. 25	 60-90 90-120	 40-80 80-100
Штамповый инструмент	*Все размеры*	60-120	30-60

Микроструктура карбонитридного слоя при всех режимах практически одинакова и состоит из двух зон. У поверхности диффузионного слоя расположена светлая нетравящаяся полоса – карбонитридная фаза, преимущественно состоящая из гексагонального нитрида железа, легированного углеродом (Fe_3N, C). Толщина этой зоны зависит от температуры и времени выдержки. При выдержке 15 мин зона нитрокарбидов отсутствует. Максимальная толщина зоны (10-15 мкм) наблюдается после карбонитрирования по режиму: температура процесса 550-570 °С, выдержка 30 мин. За зоной нитрокарбидов расположена травящаяся зона – тонкая смесь феррита, карбидов, нитридов, карбонитридов железа и легирующих элементов (вольфрама, ванадия, хрома, молибдена). Наибольшую толщину этого слоя (60-65 мкм) получают при температуре 550-570 °С и выдержке 30 мин. Зона основного металла представляет собой высоколегированный мартенсит отпуска и карбиды. На рис. 19 показана параболическая зависимость глубины δ карбонитридного слоя от времени выдержки для сталей Р18, Р6М5, Р9К5; на рис. 20 – изменение микротвердости по глубине карбонитридного слоя в стали Р9К5. Для сталей других марок результаты карбонитрирования отличаются только абсолютными значениями величин.

Карбонитрирование намного повышает износостойкость быстрорежущей стали. Например, коэффициент трения сталей Р6М5 и Р9 благодаря карбонитрированию уменьшается в 2-3 раза. Стойкость сверл, фрез и режущего инструмента других видов после карбонитрирования увеличивается в 3-5 раз.

Карбонитрирование заготовок из аустенитных сталей типа 12Х18Н10Т усиливает их стойкость против заедания, т. е. возникновения и развития повреждений поверхностей трения вследствие схватывания и переноса материала деталей пары трения под влиянием больших нагрузок при высоких скоростях скольжения и температуре.

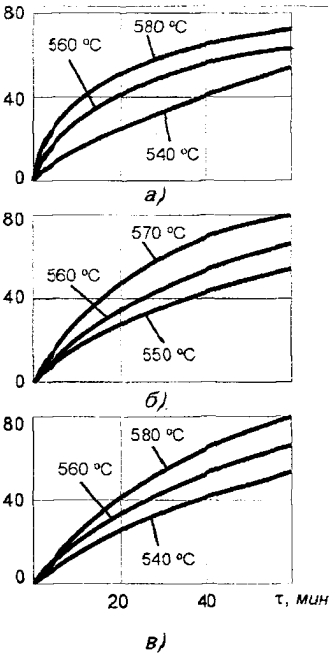


Рис. 19. Влияние времени выдержки τ и температуры на глубину δ карбонитридного слоя: *а* – для стали Р18; *б* – для стали Р6М5; *в* – для стали Р9К5

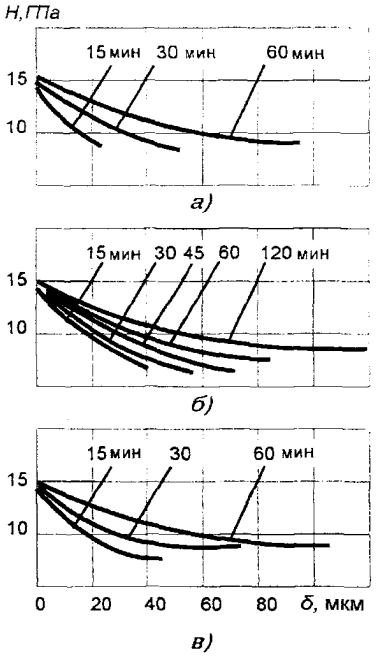


Рис. 20. Изменение микротвердости Н по глубине δ карбонитридного слоя в стали 9К5 при температурах: *а* – 540 °С; *б* – 560 °С; *в* – 580 °С

Насыщение азотом

Азотирование – процесс насыщения поверхности стали азотом. Азотированию подвергают преимущественно технологическую оснастку, изготовленную из легированных сталей 3Х2В8Ф, Х12, Х12Ф1, 7Х3, 38Х2МЮА, 20Х и 30Х, для получения высокой поверхностной твердости и износостойкости. Азотирование проводят в шахтных электрических печах сопротивления с герметичным муфелем из жаростойкой стали, снабженными вентилятором и трубками для ввода и вывода газов.

Технологическую оснастку, в том числе инструменты, а также детали машин перед азотированием улучшают, обрабатывают резанием и очищают от продуктов коррозии и грязи. Перед загрузкой в муфель азотируемые детали обезжиривают. Особо ответственные изделия, например пресс-формы для литья пластмасс, перед азотированием фосфатируют. Мелкую оснастку подвешивают в муфеле печи на мягкой стальной проволоке диаметром 0,5-1,0 мм; крупную – устанавливают на металлическую подставку на дно муфеля. Необходимо следить, чтобы рабочие поверхности деталей не соприкасались. Укладывать и подвешивать изделия следует осторожно, без ударов.

Герметичность муфеля проверяют, пропуская через него аммиак под давлением 3,5-5,0 кПа. Для этого включают печь, нагревают ее до 100 °С, затем впускают аммиак. После выхода аммиака из печи и прохождения его через бутыль, заполненную водой, измеряют давление водяным манометром. Замеры проводят в тече-

ние всего процесса; избыточное давление должно быть 2-4 кПа. Степень диссоциации аммиака контролируют по диссациометру. Температуру регулируют автоматически потенциометром. Рабочая температура азотирования 500-570 °С; продолжительность выдержки в зависимости от требуемой глубины слоя и температуры процесса задают из расчета 15 ч на 0,1 мм азотированного слоя. Продолжительность процесса азотирования быстрорежущего инструмента приведена в табл. 19; средняя скорость азотирования в зависимости от температуры процесса и глубины азотирования – в табл. 20; режимы термической обработки некоторых сталей перед азотированием – в табл. 21; оптимальные режимы азотирования – в табл. 22. Степень диссоциации аммиака зависит от температуры процесса. При 500-520 °С степень диссоциации аммиака составляет 18-25%; при 530-550 °С – 25-40%.

На рис. 21 показана зависимость продолжительности формирования азотированного слоя от температуры процесса и влияния легирующих элементов на глубину и твердость азотированного слоя. После азотирования проводят замедленное охлаждение вместе с печью до температуры 300-350 °С при сохранении подачи аммиака. Твердость азотированной технологической оснастки достигает 450-1000 HV при глубине слоя 0,15-0,55 мм. Если азотированию подвергают не всю поверхность оснастки, то элементы, не подлежащие азотированию, покрывают слоем олова или меди толщиной 0,01-0,15 мм.

После азотирования детали подвергают внешнему осмотру. Определяют величину коробления, измеряют поверхностную твердость по Виккерсу (нагрузка 100 или 300 Н) или по Супер-Роквеллу (нагрузка 100 или 150 Н), измеряют глуби-

19. Продолжительность азотирования быстрорежущего инструмента в смеси аммиака (20-40%) и науглероживающего газа (60-80%) при 550-560°С

Инструмент	Диаметр или толщина инструмента, мм	Выдержка, ч
Сверла, зенкеры, развертки	До 15 15-25 25-30	1,0-1,5 1,5-2,0 2,0-3,0
Метчики	До 16 15-25 25-50	0,5-1,0 1,0-1,5 1,5-2,0
Резьбовые фрезы: с шлифованным зубом	25-50 Св. 50	1,0-1,5 1,5-2,0
с нешлифованным зубом	25-50 Св. 50	1,5-2,0 2,0-2,5
Фрезы цилиндрические, фасонные и торцовые	До 50 50-75 Св. 75	1,0-1,5 1,5-2,0 2,0-2,5
Резцы: дисковые	До 10 Св. 10	1,0-1,5 1,5-2,0
круглые	До 5 5-15	1,0-1,5 1,5-2,0
тангенциальные	10X10 25X25	1,5 2,0

20. Средняя скорость азотирования

Глубина слоя, мм	Скорость азотирования (мм/ч) при температуре, °С		
	500	550	600
До 0,2	0,020	0,040	-
0,2-0,4	0,015	0,030	0,06
0,4-0,6	0,010	0,020	0,03
0,6-0,8	-	0,015	0,02

21. Режимы термической обработки перед азотированием

Сталь	Температура нагрева (°С) и среда		Твердость НВ
	При закалке	При отпуске	
38Х2МЮА	940, в масле или теплой воде	600-670, в масле или воде	302-341
30Х3МФ	880, в масле	580-620, на воздухе	285-321
40ХН2МА	850, » »	580-600, то же	302-341
30ХН2МА	850, » »	540-560, »	302-341
30ХН2МФА	900, » »	580-650, »	302-341
18Х2Н4МА	850-870, в масле или на воздухе	530-550, »	302-341 302-341
12Х13	1000-1050, в масле	680-780, в масле	
20Х13	1000-1050, » »	600-700, в масле или в воде	179-241 241-341
11Х11Н2В2МФ	1000-1020, в масле или на воздухе	660-710,на воздухе	269-321
10Х11Н20Т3Р	1000, В масле		
45Х14Н14В2М	Нормализация 3-5 ч, на воздухе	750, то же -	302-388 179-269

22. Оптимальные режимы азотирования стали

Сталь	Температура нагрева, °С	Продолжительность выдержки, ч	Глубина слоя, мм	Номинальная твердость поверхности HV 100
Х12Ф1	510	25	0,15-0,20	900-1000
Х12Ф1	510	55	0,20-0,30	900-1000
4Х8В2	510	36	0,30-0,35	900-1000
3Х2В8Ф	560	65	0,45-0,55	700-750
7Х3	500-520	48-60	0,40-0,50	1000-1100
38Х2МЮА	510 для первой ступени 550 для второй степени	15 25	0,5-0,6	850-1000
18Х2Н4МА	490-510	40-50	0,35-0,40	750-850
40ХН2МА	510 для первой ступени 540 для второй ступени	25 35	0,5-0,6	600
30Х3МФ	560	24	0,5	900-950
30ХН2МФА	510 для первой ступени 540 для второй ступени	25	0,5-0,6	750
40ХН2МА 38Х2Н2МА 38ХН3МФА	500-520	50-60	0,5-0,6	640-700

Продолжение табл. 22

Сталь	Температура нагрева, °С	Продолжительность выдержки, ч	Глубина слоя, мм	Номинальная твердость поверхности HV 100
40Х2Н2МА 30ХН2МФА 38ХН3МФА	510 для первой ступени 540 для второй ступени	25 30	0,6-0,7	До 640 До 700
30Х3МФ	500-525	60-80	0,35-0,55	750-800
10Х13	500 для первой ступени 550 для второй ступени 600 для третьей ступени	48	0,14-0,16 0,25-0,30 0,35-0,40	1000-1050 900-950 800-850
20Х13	500 для первой ступени 550 для второй ступени 600 для третьей ступени	48	0,10-0,12 0,25-0,30 0,30-0,40	1000-1050 900-950 780-830
15Х11МФ	530 для первой ступени 580 для второй ступени	10 20	0,35-0,40	900-950
12Х18Н9Т 18Х18Н10Т	560	50-60	0,2-0,25	1000-1100
40Х 18ХГТ	500 510	48 24	0,50 0,25	450 630-720

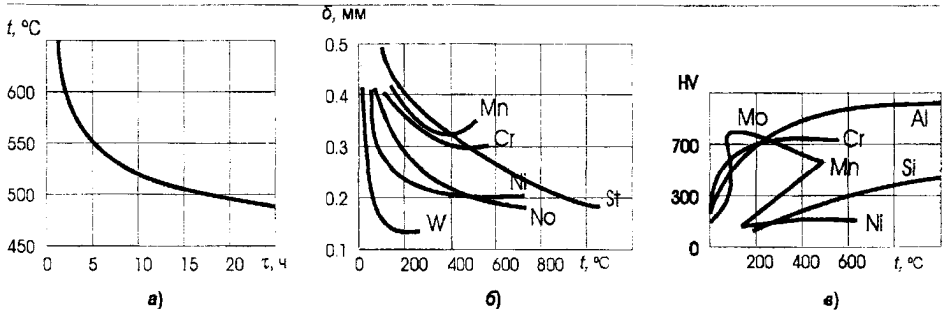


Рис. 21. Зависимость продолжительности формирования азотированного слоя одной и той же глубины от температуры нагрева *(а)* и влияние легирующих элементов на его глубину *(б)* и твердость *(в)*

ну слоя и его хрупкость по отпечатку пирамиды прибора Виккерса. Газовую среду в печи контролируют с помощью манометра, диссоциометра и счетчика для контроля расхода аммиака.

Быстрорежущие стали подвергаются жидкостному, газовому и твердому азотированию. Важным условием качественного азотирования является правильное проведение исходной термической обработки инструмента, надлежащей очистки его поверхности, отсутствие обезуглероживания. Быстрорежущие стали с большим содержанием W склонны к выкрашиванию после азотирования. Наиболее пригодны для азотирования Mo-, и W-Mo-содержащие стали. Азотирование быстрорежущей стали повышает твердость до 1300 HV; в сталях с высоким содержанием V – до 1500 HV. Для режущего инструмента предпочтительна микротвердость 1100 HV.

При жидкостном азотировании оптимальные результаты получают при 570 °С и продолжительности процесса до 15 мин. Выдержку при азотировании сверл, разверток зенкеров при температуре 570 °С определяют из расчета 0,5 мин на 1 мм сечения; при температуре 540 °С – 0,7 мин на 1 мм сечения. Азотирование инструмента для нарезки резьбы в бакелите повышает его стойкость на 50-70%; инструмента для нарезки резьбы в пластмассе, армированной стекловолокном, – в 3-4 раза. Азотирование спиральных сверл диаметром более 2 мм также повышает их стойкость. Азотированию подвергают дисковые пилы толщиной более 0,4 мм. Жидкостное азотирование постепенно вытесняет газовое азотирование инструмента из быстрорежущей стали.

Твердое азотирование инструмента из быстрорежущей стали не дало положительных результатов.

При газовом азотировании особое внимание следует обратить на качественное проведение депассивации поверхности (в 20%-ной HCl с последующей промывкой в нейтрализаторе), тщательное выдерживание продолжительности циклов процесса и степени диссоциации насыщенного газа (аммиака). Для повышения стойкости штампов и деталей пресс-форм, работающих в условиях интенсивных температурно-силовых нагрузок, применяют газовое азотирование при повторении циклов вакуумирования и подачи реагирующего газа. Изделие нагревают в вакууме до 570 °С, после чего подают реагирующий газ. По окончании выдержки в течение 10 мин печь вакуумируют и повторяют циклы в указанной последовательности 120 мин. Это повышает стабильность и воспроизводимость результатов азотирования по глубине и механическим свойствам получаемого слоя, но не позволяет увеличить глубину слоя, которая остается в пределах 0,012-0,20 мм.

Для увеличения глубины азотированного слоя и сокращения длительности процесса при азотировании инструментальных сталей, преимущественно штампового назначения, может быть использован способ по а. с. 775175 (СССР).

При азотировании деталей из инструментальных сталей выдержку в насыщающей среде ведут в течение 30-60 мин, а затем в инертной среде, например в аргоне, 20-40 мин при температуре на 100-150 °С выше температуры насыщения. Выдержку в насыщающей среде и инертном газе последовательно повторяют 2-5 раз и заканчивают обработку в насыщающей среде.

Первоначально в среде насыщающего газа при температуре азотирования 580 °С образуется слой ненасыщенного раствора, толщина которого увеличивается со временем. В насыщающей среде изделие выдерживают при температуре азотирования 30-60 мин. При меньшем времени выдержки применительно к штамповым сталям не удается достигнуть глубины азотирования слоя более 0,12-0,15 мм. Верхний предел времени насыщения выбирают из условия образования на поверхности хрупкой ε-фазы, появление которой резко тормозит диффузию азота вглубь. При принятых для инструментальных сталей температурах азотирования образование ε-фазы начинается через 60 мин. Дальнейшая выдержка в насыщающей среде нецелесообразна, так как глубина упрочненного слоя практически не увеличивается. Однако прочность его снижается в результате образования на поверхности хрупкой ε-фазы. Поэтому насыщающую атмосферу заменяют инертным газом. Благодаря большой подвижности азота в α-фазе диффузия на этом этапе протекает даже при малой его концентрации.

В инертной среде изделие выдерживают 20-40 мин (оптимальная выдержка) при температуре на 100-150 °С выше температуры азотирования. Такое повыше-

ние температуры наиболее целесообразно, так как повышается коэффициент диффузии в α-фазе примерно в 5-6 раз. При увеличении температуры более чем на 150 °С возможно снижение твердости диффузионного слоя. Указанной ранее выдержки при повышенной температуре в инертной среде достаточно, чтобы обеспечить увеличение (примерно в 2-2,5 раза) глубины азотированного слоя по сравнению со слоем, полученным после азотирования при температуре 580 °С без последующей выдержки в аргоне.

Выдержку в насыщенной среде и инертном газе последовательно повторяют 2-5 раз и заканчивают обработку в насыщающей атмосфере. При такой схеме процесса нитридная сетка, состоящая из γ- и ε-фаз, дробится. Это ведет к измельчению нитридов и увеличению интенсивности проникновения азота в раствор из насыщающей атмосферы.

Увеличение циклов выдержки до числа более 5 нецелесообразно, так как это не способствует существенному возрастанию глубины азотированного слоя.

Пример. Плоские образцы из стали 4Х3ВМФ обрабатывают в шахматной печи типа СШОЛ. В качестве насыщающей среды используют аммиак, в качестве инертной среды – аргон. Азотирование проводят при 580 °С с выдержкой 40 мин. Затем насыщающую среду заменяют аргоном и выдерживают образцы при 680 °С в течение 20 мин. Циклы выдержки в среде насыщающего и инертного газов повторяют 3 раза. Процесс заканчивают в насыщающей атмосфере. Образцы охлаждают вместе с печью до 200 °С. Общая длительность процесса составляет около 3,5 ч. Глубина диффузионного слоя равна 0,285 мм, твердость поверхности 950-1000 HV.

Несмотря на достаточно высокие результаты, достигаемые при использовании приведенного способа газового азотирования инструментальных сталей, при этом способе не исключается возможность образования хрупкой ε-фазы, которая даже в небольшом количестве резко тормозит диффузию азота и препятствует увеличению глубины упрочненного слоя.

С целью интенсификации процесса азотирования и повышения качества азотированного слоя используют способ, изложенный в а. с. 901363 (СССР).

При газовом азотировании деталей из инструментальных сталей поочередную выдержку в насыщающей среде и инертном газе, например аргоне, ведут с последовательным уменьшением длительности операций. Причем соотношение между длительностями последующей и предыдущей выдержек поддерживают равным 0,5-0,85.

На этапе первой выдержки в насыщающей среде при температуре азотирования 580 °С образуется слой ненасыщенного α-раствора, толщина которого увеличивается с течением времени. Верхний предел времени насыщения выбирают из условия образования на поверхности хрупкой ε-фазы, появление которой резко тормозит диффузию азота. Степень насыщения α-раствора азотом возрастает в период первой выдержки. Поэтому длительность последующих выдержек следует уменьшить. В противном случае, т. е. при сохранении равной длительности выдержек, возможно возрастание степени концентрации азота в α-растворе до величины, соответствующей появлению ε-фазы. Кроме того, повышение содержания азота в слое способствует сохранению остаточного аустенита после закалки, что также снижает качество слоя.

Продолжительность каждой выдержки в насыщающей среде 30-60 мин. Циклы выдержки повторяют 2-5 раз.

Если соотношения длительной последующей и предыдущей выдержек меньше 0,5, то интенсивность азотирования снижается и за две-пять выдержек не удается создать желаемую глубину азотированного слоя, т. е. 0,25-0,30 мм. Если длительность последующей выдержки снижается незначительно и соотношение длительностей поддерживается более 0,85, то качество азотированного слоя ухудшается в результате появления ε-фазы и снижения микротвердости.

Пример. Азотирование инструментальных штамповых сталей типа 4Х3ВМФ проводят при 580 °С. После замены насыщающей среды аргоном температуру повышают до 680 °С. При этой температуре образцы выдерживают 20 мин. Циклы выдержки в среде насыщающего и инертного газов повторяют 2-3 раза. Процесс заканчивают в насыщающей атмосфере. Образцы охлаждают вместе с печью до 200 °С.

В результате азотирования получают: максимальную глубину слоя 0,325 мм, микротвердость 1000-1100 HV. Если соотношения длительностей последующей и предыдущей выдержек в насыщающей среде менее 0,5-0,85, то глубина азотированного слоя уменьшается до 0,178 мм. Ухудшается его качество. Поверхностная микротвердость снижается до 950 HV (табл. 23).

Способ позволяет интенсифицировать процесс азотирования, достичь большей глубины азотированного слоя без увеличения длительности процесса. Время азотирования равно 120-122 мин. Сокращается общее время выдержки в насыщающей среде, необходимое для получения азотированного слоя заданной толщины. Общее время азотирования сокращается примерно на 30%.

Дальнейшую интенсификацию процесса азотирования и увеличение твердости азотированного слоя (преимущественно в инструментальных сталях штампового назначения) можно обеспечить термоциклированием непосредственно перед закалкой с нагревом до 1200-1250 °С и охлаждением в масле при совмещении отпуска с азотированием [а. с. 821512 (СССР)].

При этом способе химико-термической обработки инструментальных сталей, состоящем в закалке с понижением температуры, отпуске и азотировании, перед закалкой проводят термоциклирование с нагревом до 1200-1250 °С и охлаждением в масле, а отпуск совмещают с азотированием. Закалку проводят с пониженной температуры 970-1070 °С. Число циклов при термоциклировании выбирают равным трем-пяти в зависимости от марки стали.

Термоциклирование интенсифицирует процесс растворения карбидов и обеспечивает высокую концентрацию легирующих элементов в перенасыщенном а-твердом растворе термообработанной стали. Повышение легированности твердого раствора способствует увеличению растворимости азота в α-фазе, что

23. Сравнительные результаты газового азотирования стали 4Х3ВМФ при различной длительности цикла насыщения

Число выдержек	$\tau_{нас}$, мин	τ_{Ar}, мин	δ_N, мм	HV поверхности
2	50-20	20	0,178	950
3	50-40-32	20	0,325	1000-1100
3	40-36-32	20	0,235	950-980
2	50-35	20	0,282	1000-1100

Условные обозначения: $\tau_{нас}$ – длительность выдержки в настоящей среде; τ_{Ar} – длительность выдержки в аргоне; δ_N – глубина азотированного слоя.

служит одной из основных причин повышения твердости. Повышение растворимости азота в α-фазе тормозит образование на поверхности слоя хрупких высокоазотистых фаз, тем самым способствует повышению прочности.

Термоциклирование увеличивает количество дефектов кристаллической решетки, что облегчает диффузию, активизирует процесс азотирования и обеспечивает увеличение толщины диффузионного слоя.

Нагрев до температуры отпуска и длительная выдержка в процессе азотирования позволяют создать необходимые физико-механические свойства основного металла упрочняемого изделия. В результате 3-5-кратного термоциклирования происходит полная диссоциация карбидов и насыщение α-твердого раствора легирующими элементами. Например, термоциклирование сталей типа 4Х3ВМФ и 4Х4ВМФС осуществляют с нагревом до 1250 °С в каждом цикле, выдержкой в течение 6 мин и охлаждением в масло. После термоциклирования выполняют закалку с нагревом до 970 °С и охлаждением в масло. Затем проводят азотирование в среде диссоциированного аммиака при температуре (56±10) °С в течение 10 ч. В результате такой обработки глубина диффузионного слоя достигает 278-326 мкм, микротвердость у поверхности 1168 HV, на глубине 25-30 мкм 920-824 HV.

Жидкостное цианирование – обработка, которой подвергают детали машин и технологическую оснастку (в том числе, инструменты, изготовленные из быстрорежущих сталей Р18, Р9, Р9Ф5, Р9К5, Р6М3 и высокохромистых легированных сталей Х12, Х12Ф, Х12Ф1, Х12М, Х12ФТ) после окончательной обработки резанием. При цианировании происходит одновременное насыщение поверхностного слоя азотом и углеродом. Различают три способа цианирования: низкотемпературное при 540-580 °С, среднетемпературное при 820-860 °С и высокотемпературное при 920-960 °С. Цианирование на небольшую глубину (0,15-0,5 мм) осуществляют при нагреве изделия в среде цианирования до температуры 840-870 °С в течение 0,5-2 ч с последующей закалкой (непосредственно из ванны цианирования). Для увеличения глубины цианирования процесс проводят при температуре 900-950 °С в течение 2-6 ч. С целью повышения твердости, теплостойкости и противозадирных свойств изделия осуществляют низкотемпературное цианирование при 560-580 °С. Цианирование проводят в соляных (с наружным электрообогревом) или электродных печах-ваннах. Составы сред ванн приведены в табл. 24-28.

Цианат натрия готовят из кальцинированной соды $NaCO_3$ и мочевины $(NH_2)_2CO$. Для этого кальцинированную соду смешивают с мочевиной в пропор-

24. Состав сред для ванн при низкотемпературном цианировании

Номер состава	Содердание компонентов в среде, % (мас. доля)							Температура плавления, °С
	NaCN	KCN	$K_4Fe(CN)_4$	Na_2CO_3	NaCL	KON	$CaCL_2$	
1	50	50	-	-	-	-	-	490
2	96-98	-	-	4-2	-	-	-	550
3	60	-	-	40	-	-	-	420
4	50	-	-	32	18	-	-	515
5	30	-	-	45	25	-	-	535
6	-	-	90	-	-	10	-	500
7	-	-	75	-	-	25	-	490
8	-	-	3	-	65	-	32	520

25. Состав бесцианистых сред для ванн при жидкостном азотировании

Номер состава	Содержание компонентов в среде, % (мас. доля)			Температура, °С	
	$NaNO_2$	$NaNO_3$	KNO_3	Плавления	Рабочая
1	45	-	55	137	150-500
2	45	55	-	221	250-550
3	-	100	-	317	325-600
4	-	-	100	337	350-600

26. Составы сред для ванн при среднетемпературном цианировании

Номер состава	Содержание в среде компонентов, % (мас. доля)						Примечание
	Активных		Неактивных				
	NaCN	Цианосплав	NaCL	$BaCL_2$	$CaCL_2$	Na_2CO_2	
1	55-60	-	25	-	-	15	Поставляется в виде готового состава
2	30	-	70	-	-	-	-
3	30	-	40	-	-	30	Допускается применять технический NaCN
4	-	10	35	-	55	-	-
5	-	10	45	45	-	-	-

27. Составы сред для ванн при высокотемпературном цианировании

Номер состава	Содержание в среде компонентов, % (мас. доля)					
	Активных		Неактивных			
	NaCN	Цианосплав	NaCL	$CaCL_2$	$BaCL_2$	Na_2CO_3
1	50	-	15	-	35	-
2	45	-	8	-	47	-
3	8,5-14	-	25-30	-	55-60	1,0-1,5
4	12-20	-	5-8	-	75-80	-
5	-	10	40	50	-	-

ции 1 : 1,5, засыпают в тигель, предварительно подогретый до 600-700 °С, и расплавляют (температура плавления цианата натрия 550-570 °С). По мере оседания расплава в тигель добавляют сухую смесь. Во избежание выброса не следует насыпать смесь на зеркало расплавленной ванны и перемешивать ее до полного расплавления. Смесь следует добавлять при выключенной печи и появления корочки на поверхности расплава. После расплавления смесь сливают в противни слоем толщиной не более 30-40 мм.

Для закрепления деталей в процессе цианирования и при переносе их для закалки, промывки и других операций применяют специальные приспособления (рис. 22).

28. Составы высокоцианистых сред для ванн на основе мочевины (карбамида), применяемых для цианирования

Составы сред, % (мас. доля)			Температура устойчивой работы ванны, °С	Область применения
В исходном состоянии в момент загрузки	Рабочих	Регенерирующих		
$(NH_2)_2CO$ 55 (K_2CO_3) 45	KCNO 65-75 K_2CO_3 25-35 KCN до 1	K_2CO_3 45 $(NH_2)_2CO$ 55 (температура регенерации 350-360 °С	560-580	-
$(NH_2)_2CO$ 55 N_2CO_3 45	NaCNO 20-40 NaCN 12-20 Na_2CO_3 50-60	15% свежей смеси карбамида и соды в соотношении 55:45, или 10% цианата натрия (через каждые 8 ч роботы), или 4% карбамида через каждые 2 ч роботы	560-580	Для обработки конструкционных сталей
$(NH_2)_2CO$ 40 $NaCO_3$ 48 NaCl 12	-	4% карбамида или 3% цианата натрия через каждые 2 ч работы	-	Для обработки быстрорежущих сталей
NaCNO 25-35 KCl 28-40 Na_2CO_3 25-35	- - -	- - -	- - -	- - -
KCNO 60-75 K_2CO_3 25-40	KCNO 60-75 K_2CO_3 25-40 До 1 KCN	- - -	- - -	Для обработки конструкционных сталей

Примечание. $(NH_2)_2CO$ – карбамид; K_2CO_3 – углекислый калий (поташ); Na_2CO_3 – углекислый натрий; NaCNO и KCNO – цианаты.

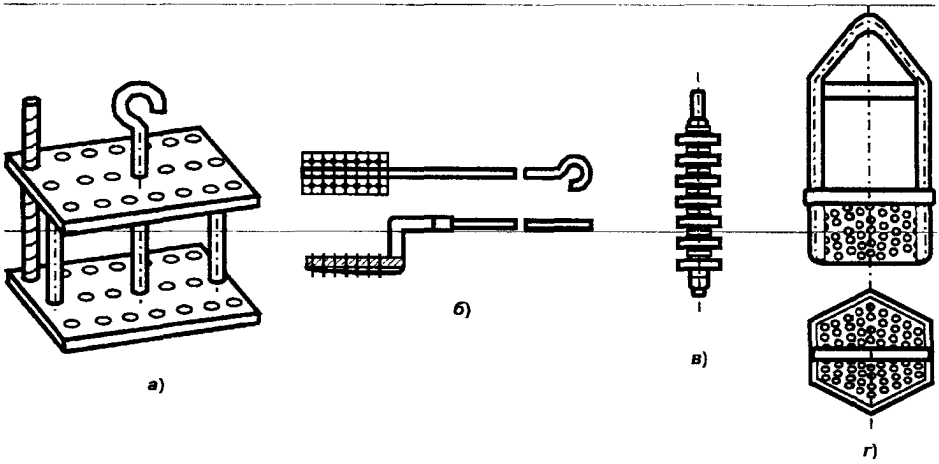


Рис. 22. Приспособления при химико-термической обработке, используемые для закрепления и переноса деталей: *а* и *б* — стержневой формы; *в* — типа дисков (осуществляется защита внутреннего отверстия); *г* — мелких (сетчатая корзина)

В этих приспособлениях детали находятся в положении, при котором их коробление минимально, а производительность ванны достигает максимального значения. Приспособления не должны деформироваться под действием массы цианируемых деталей, затруднять свободный доступ соли к цианируемой поверхности и препятствовать полному стеканию солей при извлечении деталей из ванн или закреплению деталей на нужном уровне над ванной при их цианировании на всю длину. Время выдержки при цианировании устанавливают в зависимости от формы и размеров деталей или инструмента, а также необходимой глубины цианированного слоя (табл. 29-32).

Перед цианированием детали подвергают обязательному внешнему осмотру. Не допускается наличие заусенцев, забоин и других дефектов поверхности. Для удаления остатков смазочного материала инструменты промывают и тщательно просушивают, так как попадание воды в ванну вызывает опасный выброс солей.

Перед цианированием рекомендуется подогревать цианируемые детали до 300-400 °С. В результате такого подогрева уменьшается коробление, что особенно важно при цианировании инструментов больших размеров и сложной формы. Кроме того, сберегается тепловая энергия ванны, следовательно, сокращается

29. Рекомендуемое время выдержки при низкотемпературном цианировании быстрорежущего инструмента

Инструмент	Диаметр или толщина инструмента, мм	Время выдержки, мин
Сверла, зенкеры, развертки	От 3 до 5 » 20 »30 Св. 30	6 15 От 1 до 23
Метчики	От 5 до 8 » 12 »20 Св. 30	5 10 От 14 до 18
Протяжки	От 5 до 10 » 20 » 30 Св. 30	8 16 От 20 до 25
Фрезы: резьбонарезные с зубьями: шлифованными нешлифованными	 От 25 до 50 Св. 50 От 25 до 50 Св. 50	 12 15 15 От 18 до 20
червячные и шлицевые с зубьями: шлифованными нешлифованными	 От 50 до 75 Св. 75 От 50 до 75 Св. 75	 16 От 20 до 35 30 От 40 до 50
цилиндрические, фасонные, торцовые со шлифованными зубьями	До 50 Св. 75	От 10 до 15 » 25 » 30
дисковые	От 1 до 5 » 5 » 15 Св. 15	От 6 до 18 » 12 » 15 » 18 » 23
Фасонные и тангенциальные резцы	-	От 12 до 30

30. Зависимость глубины цианированного слоя от времени выдержки и состава среды ванны при низкотемпературном цианировании

Время выдержки, мин	Глубина слоя (мм) при содержании NaCN, % (мас. доля)		
	90	50	30
5	0,008	0,006	0,006
15	0,020	0,018	0,015
30	0,035	0,030	0,030
45	0,037	0,035	0,035
60	0,045	0,043	0,040

31. Время выдержки при цианировании в составе, содержащем циан

Температура цианирования, °С	Время выдержки, ч	Глубина слоя, мм	Температура цианирования, °С	Время выдержки, ч	Глубина слоя, мм
820	0,5	0,15	900	0,5	0,33
	1,0	0,25		1,0	0,43
	2,0	0,38		2,0	0,60
	4,0	0,60		4,0	0,94
845	0,5	0,20	925	0,5	0,38
	1,0	0,33		1,0	0,51
	2,0	0,45		2,0	0,76
	4,0	0,70		4,0	1,12
870	0,5	0,30	950	0,5	0,4
	1,0	0,38		1,0	0,68
	2,0	0,56		2,0	0,86
	4,0	0,84		4,0	1,35

32. Зависимость глубины цианированного слоя от времени выдержки и высокотемпературных цианистых ваннах

Температура цианирования, °С	Время выдержки, мин	Глубина слоя, мм	Температура цианирования, °С	Время выдержки, мин	Глубина слоя, мм
900	25	0,20-0,25	950	120	0,80-1,00
	45	0,30-0,50		180	1,00-1,20
	90	0,50-0,80		200-360	1,40-1,60

время, необходимое для проведения процесса, и увеличивается производительность ванны. Если инструменты перед цианированием подогревают, то указанная в таблицах выдержка может быть сокращена в среднем на 25%.

Поскольку инструмент подвергают цианированию после окончательной обработки, включая заточку и шлифование, необходимо не только вести технологический процесс, но и осторожно обращаться с инструментом, чтобы не повредить режущие кромки. Для деталей из быстрорежущих сталей температура цианирования 510-550 °С, для деталей из высокохромистой стали типа Х12 – 510-520 °С. Повышение температуры приводит к снижению твердости и красно-

стойкости закаленной и отпущенной стали. После того как ванна для цианирования будет окончательно подготовлена к работе (очищена от осадков и пены, доведена до требуемой концентрации солей и до рабочей температуры), в нее загружают детали, подготовленные для цианирования. Так как верхний слой расплава солей имеет несколько пониженную температуру, то загружать детали или инструменты нужно так, чтобы участки, подлежащие цианированию были на 15-20 мм ниже уровня жидкости в ванне.

Число цианируемых деталей в партии назначают так, чтобы при загрузке всей партии температура ванны не снижалась более чем на 50-80 °С. По истечению времени выдержки, предусмотренной технологическим процессом, инструмент извлекают из ванны и удерживают над ней некоторое время, чтобы остатки солей стекли в ванну. Охлаждение извлеченного инструмента до 60-80 °С проводят под колпаком ванны или в вытяжном шкафу, чтобы предотвратить попадание в цех испарений остатков солей. Стержневой инструмент рекомендуется охлаждать в вертикальном положении, остальной – на подставках и в стеллажах, расположив его таким образом, чтобы исключить коробление.

После охлаждения необходимо удалить с изделий остатки солей. При низкотемпературном цианировании применяют соли щелочных металлов, хорошо растворимые в воде. Поэтому инструмент вместе с приспособлением погружают в бак с водой, нагретой до 80-90 °С. В нем остатки соли растворяются. Затем инструменты переносят в другой бак, заполненный 7-10%-ным раствором железного купороса, нагретым до 60-80 °С, где удаляются остатки солей. После выдержки в этом баке в течение 5-10 мин инструмент промывают в проточной воде и просушивают на воздухе или в сушильном шкафу и смазывают для предохранения от коррозии. На рис. 23 показана зависимость глубины цианированного слоя от времени выдержки в составе, содержащем, % (мас. доля): NaCN 20; NaCl 20; $BaCl_2$ 60.

Твердость цианированной технологической оснастки и инструмента должна быть не ниже 61 HRCэ. Глубина цианированного слоя составляет, мм: 0,001-0,015 для метчиков и резьбонарезных фрез; 0,015-0,02 для сверл, протяжек и разверток; 0,02-0,03 для червячных затылованных фрез; 0,08-0,2 для пресс-форм. Цианированию нельзя подвергать сверла, развертки, зенкеры диаметром менее 3 мм и метчики диаметром мене 5 мм, так как при этом повышается хрупкость их режущих зубьев.

Для контроля качества цианированной технологической оснастки проводят наружный осмотр с целью выявления поверхностных дефектов в виде трещин, за-

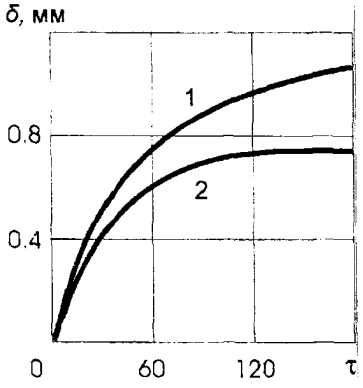


Рис. 23. Зависимость глубины цианирования δ от продолжительности τ процесса при различных температурах: 1– 940 °С; 2 – 860 °С

боин, остатков налипших солей (контролю подвергают весь обработанный инструмент); для определенного процента инструментов партии определяют: твердость цианированной поверхности с помощью прибора Виккерса при нагрузке 10-50 Н (2-3%), микроструктуру металла (2-3%), биение концевого инструмента (10-15%).

Цианирование твердыми карбюризаторами и пастами

Состав смесей для цианирования в твердом карбюризаторе при температуре 550-570 °С приведен в табл. 33; состав паст и продолжительность выдержки при цианировании сталей приведены в табл. 34 и 35.

Ионное азотирование в тлеющем разряде – способ упрочнения инструмента, заключающийся в обработке (бомбардировании) поверхности заготовки потоком ионов азота. Ионы проникают в поверхностный слой детали на контролируемую глубину – 100-1000 атомных слоев. Процесс проводят в разреженной азотсодержащей атмосфере. Азотируемые изделия подключают к отрицательному электроду (катоду). Анодом служит контейнер установки (печи). Между катодом (изделием) и анодом возбуждается тлеющий разряд. Ионы азота, бомбардируя поверхность изделия, нагревают ее до температуры насыщения.

33. Смеси для низкотемпературного цианирования в твердом карбюризаторе

Номер смеси	Содержание в смеси, % (мас. доля)			
	Древесного угля	Желтой кровяной соли	Карбонатов бария, натрия и калия	Животного угля, роговой или костяной муки
1	60-80	20-40	-	-
2	40-50	15-20	15-20	20-30
3	40-60	20-25	-	-
4	50-70	20-40	5-15	-
5	40-60	-	20-25	20-40

34. Пасты, применяемые при цианировании конструкционных сталей

Компоненты пасты	Содержание компонентов (%, мас. доля) в пасте следующего номера				
	1	2	3	4	5
Голландская сажа или мелкозернистый торфяной кокс	40-50	30-60	35	45	40
Карбонаты:					
бария	-	-	15	20	15
натрия или калия	20-40	20-40	20	20	20
Желтая кровяная соль	5-10	5-10	15	15	20
Щавелевокислый натрий или калий	-	5-10	-	-	-
Цианплав	5-10	5-10	-	-	-
Муравьинокислый никель или щавелевокислый кобальт	-	5-10	-	-	-
Феррохром	-	-	15	-	-
Кварцевый песок	-	-	-	-	5

35. Глубина цианированного слоя в зависимости от режима выдержки при цианировании деталей пастами (температура цианирования 920-930 °С)

Время выдержки, ч	Глубина слоя, мм	Время выдержки, ч	Глубина слоя, мм
Паста № 1		Паста № 2	
0,75	0,85	0,50	0,70
1,00	1,25	0,75	0,80
1,50	1,65	1,00	0,90
2,00	1,80	1,50	1,25
3,00	2,00	2,00	1,60
4,00	2,50	2,00	1,60

Для получения нитридных покрытий используют установку, оснащенную герметичной камерой с расположенным в ее центре электродом-подставкой, на которую устанавливается обрабатываемое изделие. Над электродом-подставкой расположен кольцевой анод. Через камеру прокачивается смесь азота с водородом. Причем отношение концентраций N_2/H_2 колеблется в пределах 0,5-2,0. Рабочее давление в камере 0-665 Па, напряжение разряда 400-800 В, ток 0-1 А, температура нагрева изделия при обработке 300-500 °С.

Процесс ионного азотирования выполняют в две стадии: первая – очистка изделий катодным распылением; вторая – собственно насыщение. Катодное распыление проводят в течение 5-60 мин при напряжении 1100-1400 В и давлении 13-26 Па, температура поверхности азотируемого изделия не превышает 250 °С. Собственно азотирование выполняют при 470-580 °С при разрежении 130-1300 Па и рабочем напряжении 400-1100 В; продолжительность процесса составляет от нескольких минут до 24 ч в зависимости от требований к свойствам обработанной поверхности. Неазотируемые поверхности гальванически покрывают, например, никелем (толщина покрытия 10-15 мкм) или используют специальные экраны. Ионное азотирование выполняют в вакууме на оборудовании, аналогичном используемому при электронно-лучевой сварке. Требуемая чистота потока ионов составляет 90%.

Установка для ионного азотирования состоит из вакуумной рабочей камеры, источника высокого напряжения и диффузионного насоса. Отечественная промышленность выпускает печи для ионного азотирования типа НШВ-28.7/6.

Преимущества ионного азотирования в сравнении с обычным жидкостным и газовым азотированием состоят в возможности целенаправленного создания структуры поверхностного слоя, применении достаточно низких температур процесса (до 500 °С) и сокращении продолжительности обработки. Процессы ионного азотирования не сопровождаются фазовой перекристаллизацией. Общая толщина диффузионного слоя достигает 0,4-1 мм. Причем слой в несколько микрон состоит только из нитридов железа и обладает максимальной твердостью. Длительность процесса ионного азотирования колеблется в пределах 0,5-36 ч в зависимости от требуемой глубины упрочненного слоя. При ионном азотировании повышаются поверхностная твердость и износостойкость таких сталей, которые обычному азотированию не поддаются.

Ионному азотированию подвергают штампы и деформирующие инструменты различных типов, режущие инструменты, в том числе протяжки, червячные

фрезы, метчики, долбяки, детали оборудования для переработки пластмасс, детали машин, работающие на износ в условиях повышенных температур.

Насыщение бором

Борирование – диффузионное насыщение поверхности металла бором с образованием боридов железа Fe_2B и FeB, применяемое для повышения износо- и красностойкости изделий, а также изделий, работающих при пониженных температурах, знакопеременных и ударных нагрузках или в агрессивных и абразивных средах. Борированию подвергают любые стали. Процесс проводят в смеси борсодержащих порошков, паст, газов или в расплаве солей (табл. 36). Преимущественное использование – упрочнение металлических поверхностей, работающих на истирание, например: быстрорежущего инструмента, штампового инструмента, пресс-форм, деталей дробильных машин, желобов грохотов, башмаков коксовыталкивателей и деталей, работающих при 500-850 °С. Примеры режимов борирования некоторых инструментов приведены в табл. 37.

Борированные детали из углеродистых сталей подвергают ступенчатой закалке в водных растворах селитр или щелочей; легированные борированные стали (в том числе быстрорежущие) – изотермической закалке. Нагрев борированного инструмента для термической обработки (нормализация, закалка с отпуском) рекомендуется выполнять в соляных ваннах состава, % (мас. доля): NaCl 50; KCl 50 (для сталей ХВГ, 45, 40Х, 9ХС, Х, ШХ15, У8А, У10А, 5ХНВ, 6ХВ2С и др.) или NaCl 22; $BaCl_2$ 78 (для сталей, имеющих температуру закалки 1000 °С и выше). Целесообразен нагрев борированных деталей в вакуумных печах или печах с защитной атмосферой.

При борировании возможно изменение размеров детали. Поэтому обработку точных и высокоточных деталей рекомендуется осуществлять в такой последовательности: предварительная обработка резанием (обдирка); улучшение (закалка и низкий отпуск по режимам, соответствующим маркам сталей); обработка резанием с припуском на финишную обработку и доводку, борирование или хромирование, термическая обработка для создания требуемых свойств основного металла; окончательная доводка размеров упрочненных деталей методами обработки (шлифование, полирование). Если осуществляется последовательное многокомпонентное насыщение поверхности детали, то операцию улучшения выполняют после цементации перед борированием.

Насыщающие смеси (порошки, пасты и т. п.) состоят из боросодержащих соединений (карбида бора, аморфного бора, буры, борида магния, борного ангидрида, тетрафторбората калия, борфтористого калия, оксида бора и др.), активаторов (фтористый натрий, хлористый натрий, фтористый аммоний, хлористый аммоний, сера, фтористый калий и др.) и восстановителей (оксид алюминия, фтористый алюминий, алюминий и др.) в различных композиционных сочетаниях. Выбор состава смеси определяется условиями работы упрочняемой поверхности (необходимыми глубиной диффузионного слоя, твердостью, рабочей температурой, скоростью изнашивания и т. п.), требованиями защиты окружающей среды (токсичностью, теплопроводностью и т. п.) и экономическими соображениями (трудоемкостью, расходом и стоимостью ресурсов и ингредиентов).

Как правило, насыщающие смеси можно использовать многократно (15-20 раз), без существенного корректирования их состава или с добавлением неболь-

36. Методы борирования стали

Насыщающая среда	Температура среды, °С	τ, ч	δ, мм	Примечание
Борирование в порошковых смесях				
Порошки аморфного бора, карбида бора или ферробора + 30-40% глинозема + 1-3% хлористого аммония	950-1050	3-6	0,1-0,3	Изделия упаковывают в ящики, заполненные боризатором. Применяют борирование в среде водорода и при вакууме
Электролизное борирование				
Расплавленная бура Расплавленная бура + 40-60% борного ангидрида	900-950 900-950	2-6 2-4	0,1-0,4 0,15-0,35	Плотность тока на катоде (изделие) 0,15-0,2 А/см^2, анод-графитовый стержень; напряжение 6-24 В
Жидкостное борирование				
Расплавленная бура + 30-40% карбида бора или ферробора Расплавленная смесь из 50% хлористого бария и 40% хлористого натрия + 10% карбида бора или 10% ферробора	950-1000 900-1000	3-5 1-3	0,15-0,40 0,05-0,25	Рекомендуется для изделий сложной формы
Газовое борирование				
Диборан, разбавленный водородом (от 1:25 до 1:150) Треххлористый бор	800-850 750-950	2-4 3-6	0,05-0,20 0,05-0,25	Позволяет выполнить процесс при низких температурах (500-550 °С) Недостаток – токсичность и взрывоопасность

Условные обозначения: τ — продолжительность выдержки; δ — глубина борированного слоя.

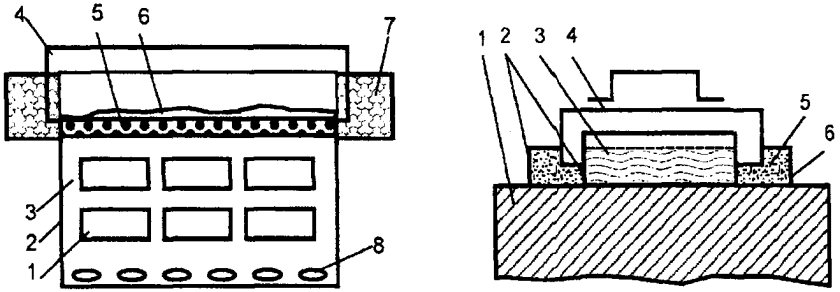
37. Режимы порошкового диффузионного борирования деталей технологической оснастки

Борируемые детали	Сталь	Режимы борирования		Глубина слоя, мм	Микротвердость HV
		Температура, °С	Выдержка, ч		
Пуансоны для гибки деталей в холодном состоянии	У8А	900	3	0,04	18000
Резьбонакатные плашки	Х12М	1050	6	0,08	19000
Матрицы формовочных штампов	ХВГ	900	4	0,08	19500
Зажимные цанги	40Х	900	3	0,05	17500
Слесарный инструмент	9ХС	900	4	0,07	18500
Молотовые штампы	5ХНВ	900	6	0,09	1800

шого количества активаторов. Процесс осуществляют в герметичных металлических контейнерах или с помощью специальных приспособлений, позволяющих провести местное (зональное) борирование крупногабаритных деталей, совмещенное с их нагревом для термической обработки (рис. 24).

На дно контейнера (см. рис. 24, *а*) из жаростойкой стали насыпают слой строганого парафина, на него слой борсодержащего порошка (толщиной 10-20 мм) и укладывают ряд деталей. Аналогично рядами послойно укладывают остальные детали. Верхний ряд засыпают борсодержащим порошком, толщиной слоя 15-20 мм. Сверху укладывают асбестовый лист, засыпают его слоем в 5-10 мм речного песка и закрывают контейнер крышкой. Зазор заполняют натросиликатным стеклом. Контейнер помещают в печь с температурой 950-1000 °С. При нагреве пары парафина вытесняют из контейнеров воздух. По мере дальнейшего повышения температуры натросиликатное стекло плавится, образуется герметичный жидкий затвор.

В результате борирования стойкость штампового инструмента из углеродистых сталей повышается до 10 раз, из легированных инструментальных сталей –



а) *б)*

Рис. 24. Схема упаковки деталей при общем или местном борировании в порошке:
а — общее борирование; б — местное борирование; 1 — деталь; 2 — контейнер; 3 — борсодержащий порошок; 4 — крышка; 5 — асбестовый лист; 6 — песок; 7 — нитросиликатное стекло; 8 — парафин; 9 — стенка внешнего контейнера

в 3-4 раза. Общие недостатки борированных поверхностей – их выкрашивание при эксплуатационных температурах, превышающих 880 °С; продавливание и откалывание боридных слоев высокой твердости, опирающихся на более мягкую основу; твердость восстановления изношенных поверхностей из-за высокой твердости остатков боридных слоев.

Эффективный состав насыщающей порошкообразной смеси для борирования стальных изделий [а. с. 933801 (СССР)] содержит, %: оксид алюминия Al_2O_3 34-36; салициловую кислоту $C_7H_6O_3$ 4-6; карбид бора B_4C – остальное.

При нагревании смеси салициловая кислота, разлагающаяся при низкой температуре, распадается с образованием активных атомов углерода, водорода и их соединений, которые вытесняют из зоны реакции воздух, отрицательно влияющий на активность смеси, восстанавливают активный атомный бор из его соединений, входящих в состав смеси.

Для приготовления смесей используют обезвоженные порошки солей и кислот, навески которых тщательно перемешивают на противне. Готовую смесь засыпают в контейнер с плавким затвором. В центр контейнера помещают детали, предварительно обезжиренные авиационным бензином или иным способом. Затем контейнер, закрытый крышкой, помещают в электропечь сопротивления, нагретую до 950 °С. Борирование проводят в течение 4 ч. При борировании в описанном составе за 4 ч при 950 °С формируется слой толщиной 90-110 мкм. Состав нетоксичен.

Смесь другого состава готовят на основе карбида бора. Эта смесь содержит, %: карбида бора 50; оксида алюминия 43; хлористого натрия 4; фторобората калия 3.

Благодаря этой смеси на стальных деталях также формируется слой боридов глубиной 90-100 мкм при температуре 950 °С и времени выдержки 4 ч, но она токсична.

Смесь для борирования стальных изделий, повышающая стабильность свойств борированного слоя и увеличивающая скорость процесса [а. с. 802397 (СССР)], содержит, %: B_4C 6-15; $Na_2B_4O_7$ 1-4; AlF_3 0,5-3,5; Al_2O_3 – остальное, но предпочтительнее смесь состава, %: B_4C 8; $Na_2B_4O_7$ 2; AlF_3 2; Al_2O_3 88.

При приготовлении смеси смешивают предварительно прокаленные буру и глинозем с высушенными B_4C и AlF_3. Компоненты смеси подвергают обезвоживанию следующими способами: Al_2O_3 прокаливают при температуре 1000 °С в течение 1 ч; $Na_2B_4O_7$ при 520 °С в течение 1,5 ч; AlF_3 и B_4C сушат при 300 °С в течение 1 ч. Компоненты смешивают в барабане в течение 3 ч. Борирование проводят при 950-1050 °С в течение 3-4 ч в стальных контейнерах в печах с воздушной атмосферой при герметизации контейнеров плавким затвором.

Режим процесса определяется маркой обрабатываемой стали и толщиной слоя, которую необходимо получить. В результате борирования получают пластичные боридные покрытия, содержащие только фазу Fe_2B толщиной 20-100 мкм без пор и трещин. Смесь используют без регенерации 3-4 раза, после чего в нее добавляют $Na_2B_4O_7$ и AlF_3 соответственно 1 и 0,5% от массы смеси. Применение смеси позволяет реализовать нужную скорость процесса борирования и обеспечить постоянный фазовый состав во всем диапазоне концентраций. При меньшем содержании B_4C, Na_2B_4O, и AlP_8 скорость процесса борирования и его стабильность снижаются. При большем содержании указанных компонентов в боридном слое появляется фаза FeB, что увеличивает хрупкость созданного покрытия.

Пример. Пуансоны из стали Х12М размерами 45 и 50 мм, закаленные до 58-62 HRC, подвергают борированию в смеси, содержащей, %: B_4C 8; $Na_2B_4O_7$ 2; AlF, 2; Al_2O_3 88 при 1000 °С в течение 4 ч и при 1050 °С в течение 0,5 ч.

Процесс выполняют в контейнерах из стали Х18Н69Т, герметизированных плавким затвором из крупки натрий-силикатного стекла. Нагрев контейнеров осуществляют в печи с воздушной атмосферой. По истечении времени выдержки контейнеры погружают на $^2/_3$ их высоты в холодную проточную воду и выдерживают в ней 40 мин. Затем контейнеры распаковывают и борированные пуансоны подвергают отпуску при температуре 200 °С в течение 1 ч.

В результате на пуансонах создается слой фазы, содержащей Fe_2B толщиной 95 мкм. Твердость основы 56-58 HRC. Средняя стойкость борированных пуансонов – 120 000 ударов; серийных, не подвергнутых борированию, – 20 000 ударов.

Безэлектролизное жидкостное борирование выполняют в расплавленной буре с добавлением 30-40% (мас. доля) карбида бора или 20% хлористого натрия и 30% силикомарганца. Процесс осуществляется в тигельных печах-ваннах при температуре 900 °С. За 5 ч глубина боридного слоя достигает 0,2 мм. В отличие от электролизного борирования этим способом можно создать достаточно равномерный борированный слой на деталях любой формы. Однако состав таких ванн быстро истощается. Добавлять карбид бора в ванну для корректирования состава нецелесообразно, так как это приводит к снижению жидкотекучести расплава. Повысить жидкотекучесть можно путем добавления в ванну нейтральной соли, но при этом снижается активность смеси в ванне. Поэтому до полного истощения состав смеси и ее активность следует регулировать комплексными, добавляя одновременно и борсодержащие компоненты и нейтральные соли.

Пропорциональность количества компонентов и их соотношений по массе должны определяться методами химического анализа или опытным путем, по качеству борированного слоя, образуемого за единицу времени в образце-свидетеле, обработанном в данной конкретной ванне. Метод позволяет получить однофазный твердый боридный слой, преимущественно насыщенный боридами Fe_2B.

Жидкостное электролизное борирование. В металлическом тигле расплавляют буру, постепенно загружаемую порциями по 8-10 кг. В расплав помещают обрабатываемую деталь и графитовый стержень. Деталь подключают к отрицательному полюсу (катоду) источника постоянного тока, графитовый стержень – к положительному полюсу (аноду). Электроды устанавливают после того, как уровень расплава в ванне достигнет 1/4 высоты тигля. Концы электродов должны находиться на расстоянии не менее 100 мм от дна тигля и не менее 30 мм от его стенок. В электрододержатель подается охлаждающая вода, включается ток защиты тигля. Процесс обычно осуществляют при плотности тока 0,15-0,20 А/см^2 борируемой поверхности и напряжении 10-14 В. По мере заполнения ванны силу тока повышают до установленного предела.

По достижении расплавом рабочей температуры (930- 950 °С) в ванну плавно загружают детали и выдерживают в ней 2,5-3 ч. После такой выдержки глубина борированного слоя на детали достигает 0,15-0,20 мм. При выдержке до 6 ч можно получить слой толщиной до 0,35 мм. Дальнейшее увеличение времени выдержки, повышение температуры свыше 980 °С и плотности тока свыше 0,25 А/см^2 незначительно увеличивают глубину слоя, повышая его хрупкость. По окончании процесса ток выключают. Деталь извлекают из ванны, охлаждают (закаливают) на воздухе или в масле, промывают в кипящей воде 1-2 ч и подвергают отпуску по

режиму, принятому для данной стали. Перед борированием поверхность детали необходимо очистить от следов масла, окалины и других загрязнений.

Для защиты отдельных участков детали от борирования проводят гальваническое меднение или хромирование. Неполное погружение детали в ванну, как метод местного борирования, непригодно из-за сильного разъедания (эрозии) металла детали на границе раздела поверхности ванны и воздуха. Недостатки процесса жидкостного электролизного борирования – низкая стойкость тиглей и повышенный расход буры. С течением времени не весь выделяющийся бор участвует в формировании покрытия. Часть бора образует аморфный слой. Он «приваривается» к поверхности, ухудшает ее качество и препятствует адсорбции активного бора. Аморфный слой бора уносится из электролита вместе с изделием, но частично остается и в электролите, загрязняя его.

В результате при многократном использовании насыщающей среды в ней накапливается аморфный бор, который внедряется в слой боридов, создает пористость и ухудшает свойства боридного слоя.

Для повышения качества и стойкости боридного слоя к разрушению под действием динамических нагрузок электролиз расплавленных борсодержащих сред проводят в две стадии [а. с. 637462 (СССР)]. На первой стадии электролиз осуществляется при плотности тока на катоде 0,07-0,09 А/см^2 в течение 8-10 мин. За это время в поверхностном слое борируемого металла образуются центры кристаллизации боридов, которые, сталкиваясь при росте, постепенно сливаются, соединяются в сплошной слой. На второй стадии плавно снижают плотность тока до нуля в течение 1,5-2 ч в зависимости от химического состава сплава. За это время происходит частичное "рассасывание" высокоборидной фазы, что способствует уменьшению внутренних напряжений и повышает сопротивляемость борированного слоя разрушению под действием динамических нагрузок.

Пример. В предварительно расплавленную в графитовом электролизере борсодержащую смесь (бура $Na_2B_4O_7$ + 20% NaF) помещают детали или инструмент, подключив положительный полюс источника тока к электролизеру, а отрицательный – к насыщаемым изделиям. Электролиз ведут при температуре 700-950 °С (в зависимости от состава среды и насыщаемого сплава) при катодной плотности тока 0,07-0,09 А/см^2 в течение 8-10 мин (первая стадия). По истечении этого времени плавно снижают ток в цепи электролиза в течение 1,5-2 ч до нуля (вторая стадия).

В результате борирования стали марки 45 этим способом в течение 2 ч глубина боридного слоя достигает 120-125 мкм. Количество фазы Fe_2B в структуре слоя достигает 90%, фазы FeB – 10%. Улучшается качество поверхности за счет уменьшения содержания высокобористой фазы, возрастает сопротивляемость разрушению под действием динамических нагрузок.

Увеличить толщину боридного слоя и его износостойкость можно следующим способом [а. с. 773140 (СССР)]. Через 8-10 мин после начала процесса электролиза при 900 °С в расплавленную среду вводят дополнительный электрод, подключенный к отрицательному полюсу дополнительного источника тока. Положительный полюс этого дополнительного источника тока присоединяют к насыщенным изделиям. Аноды поляризуют деталь и плавно повышают плотность тока на детали до 0,4-0,07 А/см^2.

В электролитах, содержащих в своем составе только буру и фтористый натрий, можно вести процесс борирования при температуре 700-800 °С. Снише-

ние температуры борирования при улучшении качества диффузионного слоя обеспечивается при использовании электролита, содержащего, %: фтористого натрия 5-10, буры 30-40, фторбората натрия – остальное. При введении в электролит фторбората натрия изменяется химическое строение расплавленной смеси. За счет ионизации расплава уменьшается концентрация громоздких катионных и анионных группировок. Вследствие этого снижается температура плавления электролита для борирования с 694 до 400 °С. что позволяет проводить процесс диффузионного насыщения бором при температурах 500-600 °С. Такой электролит готовят следующим образом. Готовят компоненты смеси: 10% фтористого натрия, 40% буры и 50% фторбората натрия. Фтористый натрий и буру плавят в графитовом тигле. Затем в расплав вводят фторборат натрия. При борировании в этом электролите, например, быстрорежущей стали Р18 при температуре 560 °С, плотности катодного тока 0,1 А/см^2 в течение 1 ч на поверхности формируются качественные покрытия глубиной до 20 мкм и микротвердостью 1600-1800 HV.

Газовое борирование проводят в диборане B_2O_6. При нагреве до температуры более 500 °С диборан разлагается и выделяет атомарный бор, который диффундирует в поверхность детали. Процесс ведут при температуре 850 °С в газовой смеси, состоящей из 2-4% диборана и 98-96% водорода. В течение 4-5 ч можно создать боридный слой глубиной до 0,2 мм. Метод взрывоопасен. Его безопасность обеспечивается при использовании в качестве насыщающей среды смеси треххлористого бора (BCl_3) и аммиака или азота.

Борирование пастами. Составы паст, применяемых для борирования, приведены в табл. 38.

Активность борсодержащей пасты можно увеличить [а. с. 404903 (СССР)]. В целях активизации насыщающих свойств обмазки, повышения качества диффузионного слоя, проведения процесса борирования без применения высокочастотного нагрева применяют пасту, содержащую, % (мас. доля): карбида бора 40-60; фтористого натрия 40-60.

В качестве связующего используют сульфитно-спиртовую барду. Толщина обмазки детали пастой 3-5 мм. Детали, покрытые пастой, сушат в течение 2 ч при 50 °С. Борирование проводят при 1000-1100 °С в течение 5-10 мин. Время выдержки при температуре борирования назначают в зависимости от требуемой глубины диффузионного слоя.

Нагрев борируемых изделий осуществляют на установках ТВЧ и в обычных газопламенных или электрических печах.

В процессе борирования в металле формируется диффузионный слой, состоящий из боридов железа с микротвердостью 1600-2000 HV.

38. Составы паст, применяемых для борирования стали

Номер состава	Содержание компонентов, % (мас. доля)			Связывающий материал
	Карбида	Криолита	Буры	
1	50	50	-	Гидролизованный этилсиликат
2	55	45	-	20%-ный раствор жидкого стекла в воде
3	84	-	16	20%-ный раствор клея БФ-4 в ацетоне

Интенсифицировать процесс борирования стали в порошках и пастах можно применив состав, отличающийся повышенной насыщающей способностью [а. с. 685715 (СССР)]. Смесь содержит, % (мас. доля): аморфного бора 75-85; буры 10-20; тетрагидроборатов щелочных металлов 1-10. При использовании этой смеси в виде порошков или паст в металле возникают глубокие борированные слои. Борирование выполняют в течение 4-6 ч при 900-1000 °С. Толщина борированного слоя 0,06-0,25 мм, микротвердость 2000-2300 HV.

Насыщение бором и серой

Боросульфидирование применяют для повышения стойкости инструмента и технологической оснастки из быстрорежущих, штампованных и других сталей.

Смесь, используемая для боросульфидирования, содержит, % (мас. доля): борного ангидрида 38-42; алюминия 24-31; борфтористого калия 28-33; фтористого аммония 0,5-1,5; серы 0,5-1,5 [а. с. 885343 (СССР)]. Процесс одновременного насыщения бором и серой в газах ведут в герметизированных контейнерах при 550-700 °С. Газы выделяются в результате взаимодействия компонентов. В качестве связующего используют сульфитно-спиртовую барду, гидролизованный этилсиликат, жидкое стекло, раствор клея БФ-2 в ацетоне или другие связующие, крепители, клеи или лаки. При приготовлении смеси используют способ, при котором предварительно восстанавливают борный ангидрид алюминием. В полученную смесь вводят остальные компоненты, готовят обмазку, наносят ее на стенки контейнера и сушат.

Введение в состав обмазки фтористого аммония и серы обеспечивает ее газофицируемость и создает необходимую газовую среду для протекания процесса газового боросульфидирования в интервале температур 550-700 °С. При низкотемпературном насыщении на обрабатываемой поверхности формируется диффузионный слой, состоящий из борида Fe_2B, легированного серой. Присутствие серы снижает хрупкость слоя и коэффициент трения, повышает износостойкость и задиростойкость поверхностей упрочненных изделий. Пасту наносят на стенки контейнера и сушат при 70 °С. После загрузки деталей контейнер герметизируют плавким затвором на основе борного ангидрида.

Газовое низкотемпературное боросульфидирование стали У8 при 600 °С в течение 2 ч в контейнере, футерованном приведенным составом, обеспечивает образование диффузионного слоя толщиной до 10 мкм, преимущественно состоящего из боридов Fe_2B, легированных серой, и отличающегося пониженной (до двух баллов) хрупкостью.

Насыщение бором и хромом

Борохромирование осуществляют с целью повышения износостойкости деталей, работающих в тяжелых условиях при знакопеременных нагрузках и подвергающихся абразивному изнашиванию, а также для увеличения стойкости режущего инструмента. Для проведения процесса борохромирования предлагается состав, содержащий, % (мас. доля): хрома 15-20; фтористого калия 4-5; титана 3-8; карбида бора – остальное [а. с. 783359 (СССР)].

Борохромирование проводят либо в вакуумной печи, либо в герметично закрытом контейнере. Износостойкость деталей после борохромирования увели-

чивается примерно в 1,5-1,9 раза по сравнению с борированными деталями. Хрупкость борированного слоя снижается.

Стойкость деталей, в частности штампов, можно повысить, используя для борирования (борохромирования) состав по а. с. 765398 (СССР), содержащий, % (мас. доля): хрома 1,4-3,0; буры 1,5-5,0; карбида бора – остальное. Компоненты смеси прокаливают в сушильном шкафу: хром (Cr) при 300-400 °С в течение 2 ч (масса кристаллизационной воды составляет 0,9%); буру ($Na_2B_4O_7$) при 300-400 °С в течение 2 ч (масса кристаллизационной воды составляет 44%); карбид бора (B_4C) при 300-400 °С в течение 2 ч (масса кристаллизационной воды составляет 0,9%). После прокаливания компоненты взвешивают согласно массовому или процентному содержанию в смеси. Перед употреблением смесь измельчают и тщательно перемешивают. Порошок насыпают в контейнер, укладывают детали. Сверху снова насыпают порошок слоем 20-30 мм, после чего контейнер закрывают крышкой и герметизируют.

При введении в борсодержащую смесь 1,4-3% хрома улучшаются механические свойства обрабатываемых поверхностей металлов. Появляется возможность создавать диффузионные покрытия сложного состава, обладающие высокими физико-механическими свойствами, в том числе коррозионной стойкостью поверхностей упрочненных деталей.

Пример. Упрочнить пуансон и матрицу из стали У8 в смеси порошков, содержащей, % (мас. доля): технического карбида бора 91; буры технической 6; порошка хрома 3. Борохромирование осуществляют в течение 5-6 ч. Поверхность упрочненных образцов высокого качества, толщина диффузионного слоя 150-170 мкм, слой равномерный, плотный, без пор и трещин, микротвердость 2000-2200 HV. Насыщающая способность смеси без снижения ее активности – 4-5 циклов. Состав позволяет образовать равномерный и плотный диффузионный слой в структуре металла и устраняет *налипание* смеси к *поверхности* в ходе процесса.

Электролизное диффузионное борохромирование может быть проведено с использованием смеси, содержащей, % (мас. доля): борного *ангидрида* 75-80; *фтористого* натрия 12-22; оксида хрома 3-8 или оксида буры 95-97; оксида хрома 3-5; плотность тока на катоде 0,15-0,2 А/см^2; рабочая температура 850-900 °С При этой температуре часто образуется в прикатодной зоне осадок – шлам, загрязняющий электролит, уменьшающий его жидкотекучесть, электрическую проводимость, насыщающую способность. В результате на поверхности металлов формируются неравномерные по глубине покрытия. Для исключения указанного недостатка в насыщенную струю электролита, в состав которой входят бура и оксид хрома, дополнительно вводят фтористый натрий при следующем соотношении компонентов, % (мас. доля): оксид хрома 5-15; фтористый натрий 17-19; бура – остальное [а. с. 608849 (СССР)].

Благодаря введению фтористого натрия изменяется строение расплава смеси. Уменьшаются катионные и анионные группы за счет ионизации и, как следствие, уменьшается вязкость, увеличивается проводимость расплава. При указанном соотношении компонентов бура с фтористым натрием образуют эвтектику, плавящуюся при 694 °С и имеющую максимальную электрическую проводимость (при 900 °С удельная электрическая проводимость равна 80 См/м), минимальную вязкость. Введение в расплав оксида хрома менее 5% нецелесообразно, так как в этом случае процесс химико-термической обработки сдвигается в об-

ласть борирования, т. е. в покрытии формируются лишь бориды железа FeB и Fe_2B. Введение в эвтектический расплав более 15% оксида хрома в процессе электролиза усиливает скорость и количество образования шлама, затрудняющего процесс химико-термической обработки.

Для подготовки насыщающей смеси используют эвтектическую смесь, состоящую из буры и фтористого натрия, и плавят ее в графитовом тигле. Затем вводят в расплав оксид хрома. Расплав перемешивают до полного растворения оксида хрома. В приготовленной таким образом насыщающей смеси проводят электролизное борохромирование деталей в течение 2 ч при температуре 900 °С, катодной плотности тока 0,15 А/см^3, удельной электрической проводимости среды 38-55 См/м. В результате процесса формируется борохромовый слой толщиной 100-130 мкм. Шлам на катоде не образуется.

Борохромирование мартенситостареющих сталей. Прочностные характеристики деталей машин, элементов пресс-форм для литья под давлением, изготовляемых из мартенситостареющих сталей, повышают борированием и последующим хромированием при температуре 1050-1100 °С в составе, содержащем, % (мас. доля): хрома 25-75; оксида алюминия 70-20; хлористого аммония 5. Борохромирование в этом составе придает поверхностному слою жаропрочность и износостойкость. Однако слой охрупчивается и в нем появляются трещины из-за различия термических коэффициентов линейного расширения слоя и основного металла (матрицы).

Активность состава и жаростойкость диффузионного слоя могут быть увеличены при использовании насыщающей смеси, содержащей, % (мас. доля): хрома 35-45; ниобия 10-20; цинка 1-3; оксида алюминия 30-50; хлористого аммония 1-5 [а. с. 668974 (СССР)].

Введение порошка цинка в насыщающую смесь позволяет снизить температуру диффузионного насыщения металла хромом до 900-950 °С, уменьшить продолжительность процесса до 1-2 ч, способствует диффузии хрома в боридный слой. Такой режим насыщения снижает возможность образования карбонитридной сетки по границам аустенитных зерен и одновременно не вызывает их роста.

Введение ниобия в смесь приводит к образованию в поверхностном упрочняемом слое металла не только боридов хрома, но и боридов ниобия и практически устраняет возможность возникновения в слое трещин после охлаждения. Значение коэффициента термического линейного расширения диффузионного слоя приближается к значению этого коэффициента для мартенситостареющей стали; так, образующиеся бориды ниобия и хрома имеют температурные коэффициенты линейного расширения, соответственно равные 7,9-8,3.10^{-6} $К^{-1}$ и 11,1-12,8.10^{-6} $К^{-1}$.

Пример. После борирования мартенситостареющей стали в смеси карбида бора и буры при 830 °С в течение 2 ч проводят хромирование в контейнере с плавким затвором при 930 °С в течение 1 ч.

Диффузионному борированию можно подвергать не только стальные детали, но и детали из других металлов, в том числе из цветных, если существует необходимость повысить их износостойкость. Смесь для борирования титана и его сплавов [а. с. 602602 (СССР)] содержит, % (мас. доля): порошка титана 30-40; фторида натрия 2-3; оксида бора 30-40; оксида алюминия – остальное. Процесс насыщения

бором титана и его сплавов длится 2- 6 ч при температуре 750-1000 °С. Образующийся боридный слой имеет хорошую структурную связь с основным металлом и состоит преимущественно из боридов титана TiB, TiB_2, Ti_2B_5. Микротвердость борированной поверхности 2500-2800 HV.

Приведенные способы позволяют в поверхностном слое металла довести концентрацию дополнительно легирующих элементов до количества, составляющего не более 4-20% от концентрации боридов, содержащихся в поверхностном слое.

Такое содержание легирующего элемента в поверхностном слое часто недостаточно для изделий, работающих в особо жестких условиях эксплуатации (при повышенных температуре и давлении, высоком содержании абразива в среде и т. д.). Повысить износостойкость борируемых поверхностей изделий благодаря увеличению концентрации легирующих элементов в поверхностном слое, а также толщины слоя можно, используя высокотемпературный нагрев и выдержку в порошковой среде, содержащей в качестве насыщающего агента диборид легирующего элемента, а также активатор и инертный разбавитель. Процесс диффузионного насыщения в таких средах осуществляют двухступенчато, с выдержкой при 800-900 °С в течение 1 ч и при 1000-1050 °С в течение 2 ч. Двухступенчатый нагрев способствует активации атомов бора уже на первой ступени нагрева. На этой стадии бор почти полностью диффундирует в поверхностный слой металла обрабатываемого изделия.

Нагрев до температуры второй ступени активизирует атомы легирующих элементов, например, титана, циркония и др., проявляющих свою диффузионную активность при более высокой температуре, чем атомы бора. При этом атомы бора не препятствуют проникновению атомов легирующего элемента в поверхностный слой металла, так как они уже почти полностью диффундировали в него на первой ступени нагрева. Концентрация легирующего элемента и глубина его проникновения в поверхностный слой зависят от времени выдержки на второй ступени нагрева.

Пример. Детали, изготовленные из сталей 45Х и ШХ15, обрабатывают в порошковой среде, содержащей 10% диборида хрома, титана или циркония, 3% активатора и 87% инертного разбавителя. Нагрев осуществляют в контейнере по двухступенчатому режиму с выдержкой, каждой партии деталей при температуре 800-900 °С в течение 1 ч, а на второй ступени нагрева – при температуре 1000-1050 °С в течение 2 ч. В результате такой обработки повышается концентрация легирующего элемента в поверхностном слое на 15-20%, толщина слоя увеличивается примерно в 1,5 раза.

Для интенсивного местного диффузионного борирования поверхностей крупных деталей, работающих в условиях истирания и ударных нагрузок при 500-850 °С, без разборки изделия, непосредственно в период его эксплуатации (например, на деталях дробильных машин, башмаках коксовыталкивателей, желобах грохотов и др.) может быть использован способ [а. с. 784698 (СССР)], при котором на поверхность упрочняемого металла наносят энерговыделяющую пасту, состоящую из оксида железа и алюминия в смеси с диффузионно активной борсодержащей составляющей. Паста воспламеняется (поджигается). В процессе горения из борсодержащего вещества пасты выделяется диффузионно активный бор, насыщающий обрабатываемую поверхность, в результате чего происходит борирование. В качестве борсодержащей составляющей используют бор, ферробор или оксид бора.

На металлическую поверхность наносят слой пасты, содержащей ферробор или оксид бора, из расчета 0,9-4,8% бора в смеси с оксидом железа и алюминия. При горении пасты образуется ферроборное покрытие, металлургически связанное с основой. Поверхность, на которую наносят покрытие, может быть из черного металла и иметь любую конфигурацию. По периметру обрабатываемой поверхности устанавливают экран из огнеупорного материала.

В ряде случаев сверху экрана помещают графитовые пластины, в одной из которых оставлено отверстие для введения заряда. Пластины служат для предотвращения выплескивания вещества заряда, удержания теплоты реакции заряда и более полного ее использования для образования покрытия. Заряд воспламеняют обычными способами.

Кроме алюминия в таких пастах топливом могут служить магний, кальций, кремний или сплав кальция с кремнием. Топливо можно частично заменять на алюминиевый порошок. Заряд состоит приблизительно из трех частей оксида железа, предпочтительно Fe_2O_3 (может быть взят другой оксид железа – Fe_3O_4). Ферробор вводят в виде дробинок. Покрываемую поверхность металла целесообразно предварительно нагреть до 780-1100 °С. В результате экзотермической реакции образуется плотный металлический слой покрытия, металлургически связанный с основанием. Менее плотный слой шлака собирается сверху металлического слоя.

После завершения реакции графитовые пластины удаляют с огнеупорного экрана. На корку шлака помещают слой песка, шамотного порошка или другого подобного материала. Расплав покрытия начинает затвердевать со дна. Это способствует образованию прочного беспористого слоя. Поверхность изделия может быть охлаждена до того, как твердый поверхностный слой затвердеет. Разбив шлак, его удаляют с поверхности.

Ферроборное покрытие в основном содержит 20-90% Fe_2B, предпочтительно 45-80% Fe_2B, но лучше 60-80% Fe_2B и имеет толщину 2,5-6,2 мм.

Покрытие может быть получено не только на стальной поверхности, но и на меди, олове, никеле, хроме, кобальте, молибдене, латуни, бронзе, различных ферросплавах и легированных сталях.

Насыщение бором и медью

Комплексное диффузионное насыщение поверхности металла соединениями бора и меди, выполняемое для увеличения толщины диффузионного слоя и повышения его пластичности в условиях эксплуатации при температуре до 850-900 °С, называют *боромеднением*. Процесс используют при упрочнении штампового инструмента для горячей штамповки. Боромеднение проводят до основной термической обработки. Стойкость боромедненных штампов, например, изготовленных из стали 7Х3, в сравнении со стойкостью закаленных штампов из этой же стали повышается до 4 раз.

Смесь для боромеднения содержит 96-98% B_4C и 2-4% Cu. Перед приготовлением смеси карбид бора прокаливают при температуре 400-450 °С в течение 1 – 1,5 ч. Режим боромеднения: температура 910-920 °С, время выдержки с момента достижения рабочей температуры в контейнере 6 ч, охлаждение в печи до 400-450 °С, затем – на воздухе до температуры не ниже 50-80 °С. После выгрузки из контейнера детали очищают от следов карбида бора сухой ветошью. Для повышения

твердости основы до 45-50 HRC боромедненые штампы подвергают термической обработке в режиме: нагрев в безокислительной среде (древесном угле) до температуры 840-860 °С, выдержка в течение 3 ч с последующим охлаждением в масле и немедленный отпуск при 430 °С в течение 3,5 ч (для стали типа 7Х3).

Свойства диффузионного боромедного слоя можно улучшить [а. с. 724602 (СССР)]. Для этого изделие упаковывают в контейнер с насыщающей смесью, состоящей из 85-90% технического карбида бора и 10-15% порошка меди, загружают в печь, нагревают до температуры насыщения (900-1050 °С) и выдерживают в печи 2-6 ч. После этого контейнер с изделиями вынимают из печи, охлаждают в воде и распаковывают. В результате на поверхности изделий образуется диффузионный слой толщиной до 240 мкм, микротвердостью 1450-1550 HV, содержащий 0,7% меди. Спекание состава и припекание его к насыщаемой поверхности не наблюдается. Устраняется необходимость дополнительной очистки изделий в кипящей воде.

Состав позволяет при прочих равных условиях увеличить толщину боромедного слоя в 1,5-2 раза и повысить его пластичность в 1,4-1,6 раза по сравнению с известными составами. Боромедненые изделия подвергают дальнейшей термической и механической обработке.

Насыщение бором и алюминием

Бороалитирование – обработка поверхностей металлических деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания и трения без смазочного материала, состоящая в диффузионном насыщении соединениями бора, алюминия и азота [а. с. 581168 (СССР)].

Повышение прочности, износостойкости и сопротивления схватыванию бороалитированных изделий из конструкционных и инструментальных сталей достигается благодаря содержанию в рабочем слое металла до 1,5% Al в алюминидах железа и сложных алюмоборидных фазах, составляющих бороалитированный слой, а также дополнительного легирования азотом твердого раствора бора и алюминия в железе.

Способ состоит в следующем. Стальные изделия бороалитируют в течение 2-2,5 ч в расплаве буры с добавлением 10% оксида алюминия при температуре (930 ± 10) °С и плотности тока электролиза 0,15-0,20 А/см^2. Затем изделия в зависимости от требуемых свойств сердцевины основного металла охлаждают на воздухе или закаливают. После промывки и очистки их помещают в печь для газового азотирования. Процесс газового азотирования проводят при (510 ± 10) °С в среде диссоциированного аммиака со степенью диссоциации 25-30% в течение 25 ч.

Поверхности изделий из сталей ШХ15, У8А, 40А И 45, обработанные по указанному режиму, имеют глубину упрочненного слоя 0,25-0,4 мм. Характерная особенность микроструктуры – наличие темно-травящейся зоны непосредственно под слоем. Такая зона твердого раствора бора и алюминия в железе, дополнительно легированного азотом, наиболее отчетливо проявляется в сталях карбидного класса, например ШХ15.

Азотирование повышает твердость бороалитированных покрытий. Если после бороалитирования твердость поверхности стали ШХ15 не более 950 HV 10, то после азотирования она увеличивается до 1650 HV 10.

Насыщение бором и цирконием

Бороцирконирование – диффузионное насыщение стали при электролизе легирующих элементов из расплавов, содержащих, например, буру, криолит, глинозем, двуоксид циркония. Однако такой состав пригоден только для электролизного бороцирконирования, требует применения дорогостоящего оборудования, использования источников постоянного тока, сложен в эксплуатации и затрудняет проведение термической обработки непосредственно после процесса химико-термической обработки.

На практике часто используют состав, содержащий, % (мас. доля): диборида циркония (ZrB_2) 47; инертной добавки (оксида алюминия Al_2O_3) 50; активатора (фтористого алюминия AlP_3) 3. Процесс диффузионного насыщения проводят в герметичных жаростойких контейнерах. Недостатки этого состава: довольно низкая скорость формирования бороцирконированных диффузионных слоев, необходимость использования дорогостоящей оснастки, невозможность проведения закалки после химико-термической обработки.

Можно увеличить насыщающую способность состава и обеспечить возможность проведения процесса в окислительной среде без защитной обмазки [а. с. 685717 (СССР)]. Для этого в состав, содержащий порошкообразный диборид циркония, дополнительно вводят карбид бора, в качестве инертной добавки – железную окалину и в качестве активатора – фтористый натрий при следующем содержании компонентов, % (мас. доля): карбида бора 45-60; диборида циркония 5-10; фтористого натрия 5-10; железной окалины 25-40. Для приготовления обмазки применяют следующие компоненты: технический карбид бора, железную окалину (отходы кузнечно-термического производства), фтористый натрий марки Ч, диборид циркония порошкообразный.

Смесь компонентов в виде обмазки наносят на упрочняемые поверхности. Обмазку готовят смешиванием порошкообразных компонентов (размер фракции 0,1-0,2 мм) с гидролизованным этилсиликатом, используемым в качестве связующего. Слой обмазки толщиной 4-5 мм наносят на образцы окунанием. После сушки в течение 10-20 мин при нормальной температуре на воздухе детали помещают в электропечь, нагретую до температуры процесса химико-термической обработки 900 °С, и выдерживают в ней 4-6 ч. Процесс совмещают с нагревом для термической обработки, т. е. закалку, которую проводят с температуры диффузионного насыщения. При закалке обмазка теряет прочность и отделяется от поверхности образца.

Состав позволяет проводить процесс в обычной печной среде при длительных выдержках и высоких температурах (1-20 ч при 900-1100 °С). Глубина диффузионного слоя в сталях типа 40Х, 45 достигает 95-145 мкм.

Насыщение хромом

Диффузионное хромирование – процесс насыщения поверхности металла хромом и его соединениями. Процесс диффузионного хромирования может использоваться для повышения жаро- и износостойкости, а также кавитационной и коррозионной стойкости деталей машин и инструмента в машиностроительной, химической, приборостроительной и других отраслях промышленности. Диффузионно хромированные изделия обладают повышенной окалиностойкостью до

температуры 800 °С, а при содержании хрома в поверхностном слое 0,3-0,4% – повышенной твердостью и износостойкостью. Хромированию можно подвергать изделия, изготовленные из любых марок стали. Его проводят в высокотемпературных печах. Составы рабочих смесей на основе феррохрома, рекомендуемые для выполнения процесса хромирования, приведены в табл. 39.

Состав на основе оксида хрома содержит, % (мас. доля): оксида хрома 55-60; алюминия 10-15; фтористого алюминия 3-5; оксида алюминия – остальное.

При последовательном карбохромировании и хромотридизации в качестве источника хрома применяют 70%-ный феррохром ФХО10. Из феррохрома можно отливать плиты, стержни, втулки и другие детали для неконтактного диффузионного хромирования в вакууме деталей сложной конфигурации или отдельных частей деталей. Для увеличения сублимирующей поверхности феррохром измельчают или гранулируют. Хорошие результаты получают при использовании металлического хрома марки ХО в качестве источника комплексного насыщения.

В процессе хромоалитирования источником хрома и алюминия служит специально выплавленный сплав (80% Cr + 20% Al), обеспечивающий равномерное испарение хрома и алюминия при неконтактном вакуумном способе.

Хромборирование проводят последовательным и непрерывно-последовательным способом. Источником для выделения активного бора служит смесь порошков карбида бора и металлического бора. Приготовление хромирующей смеси осуществляется следующим образом. Взвешивают отдельные составляющие смеси. Отвешенное количество хрома и оксида алюминия (глинозема) смешивают и просушивают при температуре 60-100 °С в течение 1-2 ч. Затем все компоненты тщательно смешивают (металлический хром, получаемый в кустах, размельчают в шаровой мельнице до порошка). Хромирующая смесь может быть использована многократно при условии добавления в нее 10% свежей смеси. Хранят смесь в сухом месте в ящиках с крышками. Для хромирования детали, очищенные от коррозии и загрязнений, загружают в нагревательную печь в контейнерах с обычной крышкой, уплотняемой обмазкой, или в контейнерах с плавким затвором (рис. 25).

39. Составы рабочих смесей для хромирования в порошках на основе феррохрома

Номер состава	Содержание компонентов, % (мас. доля)				
	Феррохрома	Оксида алюминия	Хлористого алюминия	Других	Область применения
1	25	72	3	-	Для деталей из углеродистых сталей
2	-	70	5	Cr 25	
3	75	20	5	-	
4	-	26	2	Al 12; Cr_2O_3 60	
5	50	47	3	-	Для деталей из легированных сталей
6	-	45	5	Cr 50	
7	50	-	5	Cr_2O_3 45	Для деталей, которым требуется повышенная твердость
8	45	8	2	Cr_2O_3 45	

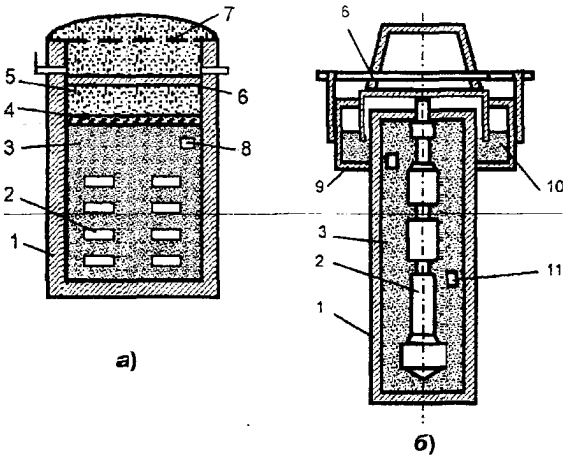


Рис. 25. Контейнеры:
***а* – с крышкой, уплотняемой обмазкой;**
***б* – с плавким затвором;**
1 – контейнер;
2 – обрабатываемые детали;
3 – хромирующий порошок;
4 – асбестовая крошка;
5 – смесь глины и угля;
6 и 9 – крышка;
7 – замазка;
8 и 11 – образец-свидетель;
10 – плавкий затвор

При упаковке изделий в ящики расстояние между стенками ящика и изделиями должно быть не менее 25 мм. Перед укладкой изделий на дно ящика насыпают хромирующую смесь слоем 20-30 мм. После укладки изделий и образцов-свидетелей вновь засыпают хромирующую смесь слоем 30-40 мм. Поверхность слоя закрывают листовым асбестом, затем надевают крышку. Герметизацию контейнера обеспечивают заполнением герметизирующего желоба сухим песком или шамотным порошком.

Ящики загружают в печь при температуре печи не выше 400 °С. До температуры 600 °С нагрев осуществляется со скоростью 100 °С/ч. Рабочая температура процесса 950-1100 °С, время выдержки 6-12 ч, скорость хромирования 0,02-0,04 мм/ч. Твердость обработанной поверхности достигает 1200 HV при глубине слоя 0,3 мм.

Хромированные детали подвергают внешнему осмотру. Контроль качества, твердости и глубины слоя проводят по образцам-свидетелям. Качество слоя определяют травлением, глубину слоя – по микрошлифам, твердость измеряют прибором Виккерса при нагрузке 6-10 Н.

Недостатки хромирующих составов: малая скорость формирования покрытий, необходимость применения герметичных контейнеров из жаростойкой стали и повторного нагрева при последующей термообработке хромированных деталей.

Интенсифицировать процесс насыщения, отказаться от использования тиглей из жаростойкой стали, совместить процесс хромирования с нагревом под термическую обработку и повысить технологическую и экономическую эффективность процесса можно, используя способ по а. с. 585235 (СССР). Эффект достигается введением в хромирующий состав, помимо оксида хрома, порошка алюминия и оксида алюминия, дополнительно хлористого аммония и смеси ацетона с клеем на основе фенолоформальдегидных смол, модифицированных поливинилбутиралем, при следующем соотношении компонентов, % (мас. доля): оксид хрома 30-45; порошок алюминия 10-20; оксид алюминия 14-24; хлористый аммоний 3-6; смесь ацетона с клеем на основе фенолоформальдегидных смол, модифицированных поливинилбутиралем, 19-23. В смесь ацетона с клеем компоненты вводят в следующем соотношении, % (мас. доля): клей на основе фенолоформальдегидных смол, модифицированных поливинилбутиралем, 10-40; ацетон 60-90.

Хромирующий состав наносят на упрочняемую поверхность слоем 1-3 мм. Насыщение ведут при температуре 900-1200 °С в течение 0,5-6 ч. Нагрев может осуществляться как в воздушной атмосфере, так и в соляных ваннах.

Данные о насыщающей способности состава (нагрев в воздушной атмосфере) приведены в табл. 40.

При необходимости увеличить толщину хромированного слоя используют активированный состав для диффузионного насыщения по а. с. 703601 (СССР). В состав для хромирования, содержащий оксид хрома и активатор, вводят двуоксид кремния и силикомишметалл, а в качестве активатора берут фтористый натрий и хлористый аммоний. При этом содержание указанных компонентов должно быть следующим, % (мас. доля): оксид хрома 38-42; силикомишметалл 23-25; фтористый натрий 2-3; хлористый аммоний 1-2; двуоксид кремния – остальное. Все материалы используют в виде порошков. Размеры частиц силикомишметалла не должны превышать 0,05 мм. Обрабатываемые заготовки помещают в контейнер и засыпают составом, предварительно восстановленным при температуре 850-950 °С. Перед засыпкой в восстановленную смесь вновь вводят активатор согласно процентному содержанию компонентов. Диффузионное насыщение проводят в герметизированном с помощью плавкого затвора контейнер. В качестве плавкого затвора используют борный ангидрид. При проведении хромирования в указанном составе образцов из стали У8 при 1050 °С в течение 4 ч образуется хромированный слой толщиной 35-40 мкм.

Хромирование пастой. Детали покрывают слоем пасты толщиной 0,5-1 мм, состоящей из 75% порошкового хрома (феррохрома) и 25% криолита, разведенных в гидролизованном этилсиликате. Затем покрытие сушат при температуре 100 °С в течение 1 ч и нагревают с помощью ТВЧ до 1050-1200 °С. На деталях из низкоуглеродистой стали за 3 мин образуется слой глубиной до 0,1 мм. При обычном хромировании для получения такого слоя при температуре 1050 °С требуется 8-10 ч. Недостаток способа – ухудшение качества поверхности из-за приваривания к ней частиц обмазки.

Вакуумное хромирование основано на том, что твердый хром обладает высокой испаряемостью. Детали и измельченный хром укладывают в металлический тигель, установленный в электровакуумной печи, и создается вакуум 1-0,1 Па. При температуре 1000-1100°С происходит испарение хрома, который заполняет рабочее пространство тигля. Контактируя с поверхностью деталей, хром диффундирует в глубь упрочняемого металла. При температуре процесса 1050 °С за 6 ч в низкоуглеродистой стали глубина хромированного слоя достигает 0,15 мм.

40. Глубина слоя (мкм) при различных режимах диффузионного хромирования инструментальных сталей

Насыщающая смесь, % (мас. доля)	Режим насыщения		Глубина слоя в сталях			
	Температура, °С	Продолжительность, ч	45	У8	ХВГ	Х12Ф1
Cr_2O_3; Al 15;	1050	4	20	20	25	40
Al_2O_3; NH_4Cl_4;	1050	6	25	25	28	40
(ацетон+клей 25)	1100	4	25	25	28	60
	1100	6	35	30	35	70

Насыщение хромом и титаном

Хромотитанирование – процесс создания износостойких комплексных карбидных покрытий, с помощью которых стойкость твердосплавного инструмента может быть увеличена в 7-10 раз. Смесь для комплексной химико-термической обработки твердосплавного инструмента содержит [а. с. 779435 (СССР)], % (мае. доля): двуокиси титана 30-40; оксида ниобия 10-20; алюминия 10-24; хлористого аммония 1-3; оксида алюминия – остальное. Процесс проводят при температуре 950-1100 °С в течение 1-6 ч в контейнерах без использования вакуума или защитных атмосфер. В результате на поверхности твердосплавного инструмента формируется износостойкое покрытие толщиной 7-15 мкм, состоящее из смеси карбидов титана (TiC) и ниобия (1NbC).

Диффузионное хромотитанирование твердосплавных пластин можно проводить в составе, содержащем, % (мас. доля): оксида хрома 12,5; оксида алюминия 14-21; хлористого аммония 1-3; алюминия 21; оксида титана 36,6. После проведения такой обработки на инструменте образуется диффузионно-легированный слой толщиной 7-9 мкм с поверхностной микротвердостью 2500-3000 HV. Стойкость твердосплавных пластин, обработанных таким способом, повышается в 3-3,5 раза.

Для увеличения толщины диффузионного слоя и повышения износостойкости инструмента может быть использован состав [а. с. 933793 (СССР)], содержащий, % (мас. доля): оксида хрома 30-35; оксида алюминия 14-21; хлористого аммония 1-3; титана 30-35; железо-синеродистого калия 7-10; парафина 1-3. Предпочтителен состав, % (мас. доля); оксида хрома 35; железо-синеродистого калия 10; титана 30; хлористого аммония 3; парафина 3; оксида алюминия – остальное. Процесс проводят при температуре 950-1000 °С в течение 1-4 ч в контейнере без использования вакуума или защитных атмосфер. На поверхности твердосплавного инструмента формируется износостойкое покрытие толщиной 10-22 мкм с поверхностной микротвердостью 2700-3100 HV, состоящее из смеси карбидов хрома и титана. Состав позволяет увеличить толщину диффузионного слоя в 2-2,5 раза относительно обработки иными способами и повысить стойкость твердосплавного инструмента примерно в 2 раза по сравнению с неупрочненным.

Насыщение хромом и кремнием

Хромосилицирование – процесс, проводимый для поверхностного упрочнения деталей машин и инструментов и состоящий в одновременном диффузионном насыщении металлов карбидами хрома и кремнием (силицидами). Может выполняться в смеси порошков феррохрома и ферросилиция.

Жидкостное хромосилицирование в расплаве [а. с. 250638 (СССР)] предполагает, что процесс насыщения осуществляют из расплава, имеющего следующий состав, % (мас. доля): кремнекислый натрий 65-75; оксид хрома 5-15; хлористый натрий 9-11; силикокальций 9-11. Процесс ведут при температуре 1000-1100 °С в течение 2-6 ч. Вместо силикокальция можно использовать другие активные восстановители. Время насыщения определяется требуемой глубиной диффузионного слоя.

Способ имеет ряд преимуществ по сравнению с известными. Он характеризуется большей производительностью, так как отпадает необходимость в прогре-

ве массивных контейнеров и порошка насыщающей смеси. Скорость формирования диффузионного слоя на 15-20% выше, чем при насыщении из порошков. Исключается изготовление герметичных контейнеров.

При насыщении этим способом (температура насыщения 1100 °С, длительность процесса 4 ч) на заготовке из стали 20 образуется диффузионный слой толщиной 0,1 мм, состоящий из твердых растворов хрома и кремния в α-железе. Слой обладает высокой жаростойкостью и коррозионной стойкостью в различных агрессивных средах. При насыщении стали У8 по тому же режиму образуется карбидный слой толщиной 20-25 мкм, состоящий из карбида хрома $Cr_{23}C_6$, легированного кремнием. Помимо свойств, отмеченных для стали 20, карбидный слой отличается высокой твердостью (1600 HV 100) и износостойкостью.

Процесс сложного диффузионного хромосилицирования стали можно осуществить с использованием порошкообразного сплава "Сормайт", имеющего следующий состав, (мас. доля): углерод 2,5-3,5; кремний 2,8-4,2; марганец 0,5-1,5; хром 25,0-31,0; никель 3,0-5,0; железо – остальное.

Из сормайта в смеси с компонентами [а. с. 582328 (СССР)] получают, например, в стали У9 диффузионный слой толщиной до 22 мкм (при температуре 1000 °С и длительности процесса 4 ч). Эту смесь можно неоднократно использовать в качестве насыщающей. Смесь содержит, % (мас. доля): хлорида алюминия 0,1-0,9; гидрооксида алюминия 0,5-2,0; порошка сормайта – остальное. Хлорид алюминия применяют в виде кристаллогидрата $AlCl_3 \times nH_2O$, где $n \leq 6$.

Твердый сплав "Сормайт 1" после приготовления покрыт оксидной пленкой. В процессе насыщения поверхностей изделий легирующими элементами она замедляет образование и выделение активных атомов хрома в реакционное пространство. Это снижает интенсивность процесса и вызывает такую концентрацию хрома в диффузионном слое, которая способствует образованию в нем преимущественно карбидов хрома твердостью 1200-1300 HV.

Интенсифицировать процесс термодиффузионного легирования в порошкообразном сплаве "Сормайт 1" и увеличить твердость диффузионного слоя можно следующим способом [а. с. 450001 (СССР)]. Перед насыщением твердый сплав "Сормайт 1" обрабатывают водным раствором состава, % (мас. доля): бура 5-15; борная кислота 15-25; хлористый аммоний 20-30; вода – остальное с последующей сушкой при 280-320 °С.

В процессе сушки оксидная пленка, покрывающая твердый сплав "Сормайт 1", взаимодействует с компонентами раствора и разрушается, что и способствует возрастанию активности твердого сплава как источника легирующих элементов в процессе диффузионного насыщения стали. Повышение концентрации хрома в диффузионном слое способствует увеличению толщины слоя и образованию в нем преимущественно карбидов хрома твердостью 1600-1800 HV.

Пример. В водный раствор, состоящий из 10 г буры, 20 г борной кислоты и 30 г хлористого аммония, добавляют 1 кг порошка твердого сплава "Сормайт 1". Смесь перемешивают, а затем высушивают при 300 °С в течение 1 ч. Получают офлюсованный твердый сплав "Сормайт 1". Затем приготовляют рабочую насыщающую смесь, содержащую 60% полученного офлюсованного твердого сплава, 39% шамота и 1% хлористого аммония, и пересыпают ею обрабатываемые детали. Термодиффузионное насыщение изделия ведут при 1000 °С в течение 4 ч.

Насыщение хромом и алюминием

Хромоалитирование применяют как поверхностное упрочнение пресс-форм из сталей типа 4Х5В2ФС для литья под давлением алюминиевых сплавов, которое повышает их стойкость до 15 раз (данные АЗЛК). Стойкость штампов холодного и горячего деформирования из сталей Х12М, 3Х2В8Ф, 5ХНМ увеличивается после хромоалитирования в 3-4 раза (данные ПО "ЗИЛ"). Диффузионное насыщение проводят в смеси, содержащей, % (мас. доля): Cr 38; V 5; Al 7; SiO 25; NH_4Cl 2; H_3BO_3 1; Al_2O_3 42 в контейнерах с плавким затвором при температурах 980 и 1050 °С. Продолжительность процесса 3-10 ч.

После стандартной термообработки (закалка при 1050 °С, отпуск при 600 °С) в поверхностном слое на глубине до 20 мкм сохраняются напряжения сжатия. Однако в подслое величина растягивающих напряжений значительно уменьшается и составляет лишь 150 МПа. При совмещении процессов диффузионного насыщения и термообработки глубина поверхностного слоя с сжимающими напряжениями увеличивается с 20 до 50 мкм. Защитные покрытия, созданные описанными способами, значительно повышают окалиностойкость поверхности штампов (при 700 °С), причем эффект такого защитного действия сильнее проявляется у низколегированных сталей типа 5ХНМ.

Комплексное насыщение ванадием, титаном, цирконием, вольфрамом, ниобием, серой, алюминием, кремнием

Ванадирование применяют при изготовлении инструментов из малолегированных быстрорежущих сталей; процесс выполняют в порошковых смесях, содержащих, например, следующие компоненты, % (мас. доля): феррованадий 60; хлористый аммоний 7; оксид алюминия – остальное.

Недостатком состава является малая глубина образуемого диффузионного слоя, не позволяющая производить заточку инструмента. Повышение износостойкости, прочности, пластичности и режущей стойкости инструмента может быть обеспечено использованием состава по а. с. 533670 (СССР). В соответствии с ним диффузионное ванадирование проводят в смеси следующего состава (%): древесноугольный карбюризатор 10-20; феррованадий 35-45; хлористый аммоний 0,5-2; оксид алюминия – остальное.

Процесс диффузионного насыщения и упрочнения осуществляют, нагревая инструмент до 1040-1050 °С в порошковой смеси, содержащей 16% свежего карбюризатора, 40% феррованадия, 1% хлористого аммония, оксид алюминия – остальное. Частицы феррованадия размельчают до грануляции 0,1-0,4 мм, смесь тщательно перемешивают и засыпают в ящик слоем 20-30 мм, на который укладывают инструмент. Затем насыпают следующий слой смеси толщиной в 20-30 мм, укладывают новый ряд деталей и т. д. Ящик герметизируют шамотной глиной. После окончания времени выдержки (6 ч) ящик охлаждают на спокойном воздухе до нормальной температуры и затем разбирают. Глубина диффузионного слоя в обработанных деталях составляет 1,4-1,6 мм.

После такой диффузионной обработки инструмент подвергают закалке с 900 °С и отпуску при 150 °С (режим обработки на первичную твердость). После диффузионного насыщения покрытия на деталях из быстрорежущих сталей Р18, Р12, Р6М3 имеют следующие свойства: твердость поверхности 48-51 HRC

(после закалки при 900 °С 67-70 HRC; после отпуска при 150 °С 67-70 HRC); механические свойства повышаются на 20-40%, износостойкость увеличивается на 50-100%, стойкость режущего инструмента – в 2-5 раз.

Применение смеси указанного состава при изготовлении рабочих деталей штампов и пресс-форм из инструментальных сталей углеродистых или легированных не обеспечивает стабильного создания необходимых свойств изделия и, в первую очередь, твердости поверхности, износостойкости и эксплуатационной стойкости из-за малой легированности этих сталей по сравнению с быстрорежущими сталями.

Для диффузионного ванадирования таких сталей может быть использован состав [а. с. 692909 (СССР)], содержащий, % (мас. доля): феррованадия 35-45; ферротитана 10-20; хлористого аммония 0,5-1,5; древесноугольного карбюризатора – остальное.

Ферротитан вводят для предупреждения начала образования карбидов ванадия, так как он является наиболее сильным карбидообразующим элементом. Состав обеспечивает получение глубоких (до 3 мм) диффузионных слоев повышенной твердости, износостойкости и эксплуатационной стойкости на рабочих деталях штампов и пресс-форм.

Пример. Осуществляют химико-термическую обработку рабочих деталей штампов и пресс-форм в описанном ранее составе при температуре 920-950 °С. Частицы феррованадия, ферротитана и древесно-угольного карбюризатора размельчают до грануляции 0,1-0,4 мм. Древесноугольный карбюризатор выполняет одновременно роль наполнителя (в смеси) и изоляции для отделения рабочих деталей штампов и пресс-форм друг от друга и предупреждения налипания. Просушенный хлористый аммоний растирают и просеивают. Перед употреблением смесь прокаливают при температуре 850-900 °С в течение 2-3 ч. Смесь тщательно перемешивают и засыпают в ящик слоем 20-30 мм. На этот слой укладывают рабочие детали штампов и пресс-форм, насыпают следующий слой также толщиной 20-30 мм, укладывают новый ряд деталей и т. д. Ящик герметизируют шамотной глиной с силикатом натрия. После окончания времени выдержки ящик охлаждают вместе с печью до 500 °С. Дальнейшее охлаждение до нормальной температуры проводят на воздухе. Затем ящик разбирают. Диффузионный слой на металле, обработанном описанным способом, формируется из расчета 0,15 мм за 1 ч.

После диффузионной обработки детали подвергают закалке с температуры на 30-50 °С ниже оптимальной, рекомендуемой для обычного процесса закалки таких сталей, и последующему отпуску на нужную твердость. Состав позволяет повысить твердость диффузионного слоя до 65-68 HRC, износостойкость в 5-10 раз и эксплуатационную стойкость в 2-3 раза.

Инструменты из малолегированных быстрорежущих сталей упрочняют диффузионным ванадированием в порошковых смесях, например, содержащих, % (мас. доля): феррованадия 60; хлористого аммония 7; оксида алюминия 33. Недостатки состава: небольшая красностойкость и малая глубина диффузионного слоя, не позволяющая производить заточку инструмента. Повышение свойств инструментов, изготовленных из малолегированных инструментальных сталей типа Р6М3, возможно при использовании состава [а. с. 536251 (СССР)], содержащего следующие компоненты, % (мас. доля): древесноугольный карбюризатор 5-15; ферромолибден 20-30; феррованадий 10-20; хлористый аммоний 0,5-2; оксид алюминия – остальное.

Упрочнение осуществляют нагревом при температуре 1040-1050 °С образцов и инструмента в смеси порошков, содержащей, % (мас. доля): ферромолибдена 27; феррованадия 19; древесноугольного карбюризатора 12; хлористого аммония 0,5; оксида алюминия 41,5.

Частицы ферросплавов размельчают до 0,1-0,4 мм и тщательно перемешивают с другими компонентами. Инструмент укладывают в ящик на слой смеси толщиной 20-30 мм. Сверху насыпают слой смеси такой же толщины. Укладывают новый ряд деталей и т. д. Ящик герметизируют шамотной глиной. После окончания времени выдержки (6 ч) ящик охлаждают на спокойном воздухе до нормальной температуры и затем вскрывают.

Глубина образующегося диффузионного слоя достигает 1,4-1,6 мм. Содержание молибдена и ванадия в слое на 2,5-3 и 1,3% соответственно выше по сравнению с исходным содержанием этих элементов в стали. Содержание углерода по сравнению с исходным повышается примерно на 0,6%. После диффузионного насыщения детали следует подвергать закалке с температуры на 50-70 °С ниже обычно принятой для стали данной марки и последующему трехкратному отпуску. При обработке сталей типов Р18, Р12, Р9К5>Р6М5 характеристика упрочненного слоя следующая: глубина слоя 1,4-1,6 мм; твердость поверхности после насыщения 48-52 HRC, после закалки при 1190 °С 38-43 HRC, после отпуска при температуре 600 °С (3 раза по 30 мин) 66-69 HRC; красностойкость 657 °С; режущая стойкость увеличивается в 2-5 раз.

Карбованадийтитанирование – комплексное диффузионное насыщение карбидами ванадия и титана поверхностей деталей штампов и пресс-форм, изготовленных из инструментальных углеродистых или легированных сталей. Процесс обеспечивает получение в металле глубоких (до 3 мм) диффузионных слоев повышенной твердости, износостойкости и эксплуатационной стойкости [а. с. 759618 (СССР)]. Рекомендуемая насыщающая смесь содержит, % (мас. доля): хлористый ванадий 20-30; хлористый титан 10-15; древесноугольный карбюризатор – остальное. Хлористый ванадий и хлористый титан введены для более полного восстановления ванадия и титана из оксида и карбидов, образующихся в насыщенной смеси, и пополнения количества ванадия и титана при регенерации обедненной смеси, бывшей в употреблении.

Пример. В смеси [содержит, % (мас. доля): VCl_2 20; $TiCl_2$ 15; карбюризатора 65] проводят химико-термическую обработку деталей из сталей У8, Х12М, 4Х5МФС при температуре (1000+50) °С.

Детали загружают в печь, нагретую до 600-700 °С, и выдерживают в течение 2 ч. Затем повышают температуру до (1000+50) °С, выдерживают 12 ч и охлаждают вместе с печью до (500±50) °С, далее – на воздухе. По окончании процесса производят механическую обработку (снятие припуска до 0,1 мм на сторону), закалку и отпуск. Механические свойства сталей после такой обработки приведены в табл. 41.

В качестве регенерирующей добавки, вводимой в обедненную отработавшую смесь, используют ту же смесь, но свежего приготовления. Регенерирующую присадку в количестве 3-5% первоначальной исходной массы смеси добавляют после трехкратного использования рабочей насыщающей смеси. Во избежание налипания смесь не должна входить в непосредственный контакт с поверхностью детали. Целесообразно, чтобы расстояние между смесью и деталью было равно не менее 5 мм.

41. Механические свойства некоторых сталей после упрочнения

Марка стали	δ, мм	HRC$_э$ после операции			$\frac{\sigma_{уп}}{\sigma}$
		Насыщения	Закалки	Отпуска	
У8	2,5	18-20	66-68	66-67	6-7
Х12М		20-24	66-69	65-68	8-10
4Х5МФС		20-25	67-69	66-68	9-10

* После упрочнения.

Примечания: 1. Кратность использования смеси – 65 раз.
2. Условные обозначения: δ – глубина слоя; $\sigma_{уп}$ и σ – износостойкость, соответственно, упрочненной и неупрочненной сталей.

Добавление небольшого количества регенерирующей смеси в отработавшую смесь сохраняет на одном уровне ее карболегирующую способность, позволяя использовать до 65 раз. Вследствие активности смеси предупреждается обезуглероживание деталей при насыщении. На поверхности деталей получается диффузионный слой повышенной твердости (900-1100 HV) и износостойкости (в 5-7 раз выше, чем при обычных методах термической обработки).

Циркотитанирование применяют для упрочнения твердосплавных инструментов, в частности вольфрамокобальтовых и титановольфрамокобальтовых режущих пластин, диффузионным насыщением их поверхности соединениями титана и циркония. Карбидные покрытия из циркония, титана и ниобия, нанесенные на поверхность твердосплавных инструментов, улучшают их эксплуатационные характеристики, т. е. повышают твердость, жаростойкость, стойкость против образования лунок, снижают адгезию режущего инструмента с обрабатываемым материалом. В результате срок службы инструмента возрастает в несколько раз. Процесс можно осуществить методами диффузии и осаждения из газовой фазы или диффузионным насыщением из твердых порошков. При осаждении из газовой фазы диффузионные слои наносят в замкнутом пространстве при пониженном давлении. В качестве насыщающей среды используют порошок технически чистого циркония крупностью 100-150 мкм, четыреххлористый углерод и полиэтилен, вводимый в реакционное пространство для науглероживания образцов в процессе нагревания.

Количество четыреххлористого углерода, полиэтилена и порошка циркония составляет соответственно 11 мл, 23 и 35 г на 1 м^2 площади насыщаемой поверхности, включая и внутреннюю поверхность реакционной камеры.

Согласно данным микрорентгеноспектрального анализа содержание циркония в карбиде циркония не зависит от температуры и времени насыщения и находятся в пределах 87-88%. В карбиде циркония не растворяется вольфрам и кобальт. Глубина проникновения циркония в насыщаемую поверхность достигает 2-3 мкм.

Зависимость глубины слоя на основе карбида циркония на твердых сплавах от температуры и времени насыщения показана на рис. 26. Металлографически слой, насыщенный цирконием и титаном, на поверхности сплавов ВК8 и Т15К6 выявляется в виде светлой нетравящейся зоны толщиной 2-14 мкм. Непосредственно под карбидной зоной обезуглероженной зоны не наблюдается, т. е. нет зоны, ухудшающей эксплуатационные свойства карбидных покрытий. В форми-

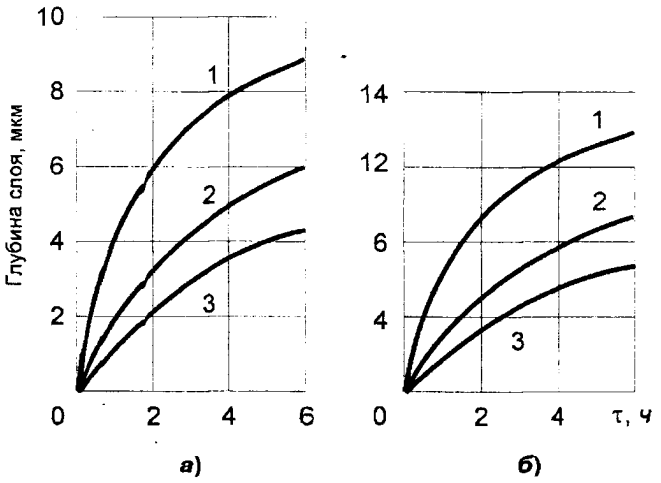


Рис. 26. Влияние температуры и времени насыщения на глубину слоя карбида циркония: *а* – на сплаве Т15К6; *б* – на сплаве ВК8; температура насыщения: 1 – 1100 °С; 2 – 1050 °С; 3 – 1000 °С

рования покрытия принимает участие не только углерод основного материала (матрицы), но и углерод, выделяющийся при диссоциации полиэтилена и четыреххлористого углерода, которые входят в состав насыщающих смесей. Микротвердость карбида циркония находится в пределах 2800-2900 единиц.

Оптимальный режим нанесения карбида циркония на поверхность сплава: ВК8 – температура насыщения 1000 °С, время выдержки 2 ч; Т15К6 – температура насыщения 1050 °С, время выдержки 2 ч.

Установлено, что стойкость пластин ВК8 с покрытием на основе карбида циркония в 2-4 раза выше, чем стойкость пластин ВК8 без покрытия, а пластин Т15К6 – в 1,5-3 раза по сравнению с серийными пластинами.

Циркосилицирование применяют для повышения жаростойкости, кислотостойкости и в некоторых случаях износостойкости рабочих поверхностей деталей машин, инструмента и технологической оснастки. Процесс проходит в порошковых средах, содержащих оксиды кремния, циркония, алюминия и хлорид аммония в качестве активатора процесса. Температура процесса 1100°С, продолжительность 4 ч (например, для стали 45). Глубина слоя насыщения до 100 мкм [а. с. 522280 (СССР)]. Рекомендуемая порошковая смесь содержит, % (мас. доля): металсиликата натрия 18-2†; метасиликата калия 42- 49; хлорида калия 3-7; хлорида натрия 3-7; силикоциркония – остальное.

Силикоцирконий применяют в виде порошка с размером гранул 0,05-1,0 мм. Наиболее приемлем размер гранул 0,2-0,5 мм. Процесс химико-термической обработки рабочей поверхности деталей осуществляют погружением в насыщающую ванну и проводят в интервале температур 750-1100°С в течение 3-8 ч. Продолжительность выдержки зависит от требуемой глубины диффузионного слоя. При указанном режиме на стали образуется диффузионный слой глубиной 170-185 мкм.

Диффузионное насыщение твердых сплавов соединениями циркония и титана из твердых порошков можно осуществить с помощью состава [а. с. 709714 (СССР)], содержащего следующие компоненты, % (мас. доля): оксид алюминия

20-45; оксид титана 10-30; оксид циркония 20-35; титан 10-30. Предпочтительна смесь состава, % (мас. доля): Al_2O_3 40; ZrO_2 30; TiO_2 15; Ti 15. При некоторых условиях изготовления твердосплавных пластин на их поверхностях, преимущественно на выступах, углах, острых кромках, т. е. на рабочих поверхностях, может осаждаться свободный углерод, снижая тем самым прочность и износостойкость инструмента. Титан, введенный в покрытие, в процессе диффузионного насыщения при высоких температурах взаимодействует с имеющимся на поверхности свободным углеродом, в результате чего образуется дополнительное количество карбида титана.

При высокоскоростном резании, когда резко возрастает температура на рабочей поверхности инструмента, стойкость инструмента обеспечивается главным образом благодаря диффузионному изнашиванию поверхности.

В этом случае карбид титана служит диффузионным барьером, препятствующим свариванию твердосплавной режущей пластины с обрабатываемой сталью и замедляющим образование наростов и лунок, что увеличивает срок службы режущих пластин. Взаимная диффузия титана, вольфрама и углерода в процессе резания при высоких температурах приводит к образованию твердого раствора TiC – WC, химически более инертного, чем WC, обладающего высокой твердостью и очень низкой растворимостью. Имеющиеся в покрытии оксиды алюминия, титана и циркония отличаются высокой твердостью и окалиностойкостью, что увеличивает износостойкость режущих пластин. В процессе термообработки оксиды частично восстанавливаются с образованием карбидов алюминия, титана и циркония, которые, в свою очередь, создают сложные молекулярные растворы, оказывают положительное влияние на режущие свойства твердосплавных пластин.

Смесь порошков, содержащую, % (мас. доля): Al_2O_3 30; TiO_2 20; ZrO_2 32; Ti 18, измельчают в шаровой мельнице в течение 60 ч. На предварительно обработанную режущую поверхность пластин сплавов типа Т15К6 и ВК8 методом окунания наносят слой пасты, приготовленный из указанных мелкодисперсных порошков, смешанных на этиловом спирте. Затем пластины отжигают в вакууме 10^{-3} Па при температуре 1400-1450 °С в течение 3,5 ч. После термообработки на поверхности пластин образуется покрытие толщиной 10-12 мкм. При обработке изделий из сталей ХВГ, ШХ15 с твердостью 35-48 HRC со скоростью резания 56-370 м/мин, подачей 1,2-2 мм/об и глубиной резания 2-4 мм стойкость режущих пластин с покрытием в 2-3 раза, а при обработке чугуна в 7-8 раз выше, чем у серийного инструмента.

Эксплуатационную стойкость твердых сплавов (например, неперетачиваемых режущих пластин, изготовленных из сплавов ВК8, ВК6, Т15К6, Т5КЮ, ТТ10К8Б и др.), применяемых для оснащения режущих инструментов, можно повысить нанесением на их поверхность диффузионных карбидных покрытий [а. с. 790842 (СССР)]. Для этого в процессе нагревания в среде галогенов и (или) галогенидов наносимого металла проводят дополнительную выдержку при температуре 500-950 °С и давлении 13,3-0,001 Па. Способ позволяет наносить покрытия на основе карбидов главным образом тугоплавких металлов и их сплавов на твердосплавные изделия без использования водорода и углеводородов, что существенно упрощает конструкцию технологического оборудования и процесс нанесения покрытий, исключает применение пожаро- и взрывоопасных компонентов используемых газовых смесей.

Пример 1. Нанесение покрытия из карбидов ниобия. Режущие пластины помещают в печь, вакуумируют установку до получения в камере остаточного давления 0,1-0,01 Па, нагревают контейнер с пентахлоридом ниобия ($NbCl_5$) до температуры 110-130 °С. Затем печь с изделиями нагревают до 600-700 °С. Открывают затвор контейнера с $NbCl_5$, откуда пары $NiCl_5$ по паропроводу поступают в реакционное пространство печи. В указанном режиме изделия выдерживают 2 ч. После этого повышают температуру печи до 1000-1100 °С (при неизменных прочих параметрах) и проводят осаждение карбида ниобия в течение не более 1,5 ч. Затем прекращают подачу $NbCl_5$ (закрывают затвор контейнера). Печь охлаждают вместе с изделиями. В результате изделия покрываются ровным, плотным, прочно сцепленным с основой слоем NiC серебристого цвета толщиной до 30 мкм.

Пример 2. Нанесение покрытия из карбидов титана. Режущие пластины помещают в печь, вакуумируют установку до получения в камере давления 0,01-0,001 Па. Нагревают контейнер с кристаллическим иодом до температуры 40-50 °С. а затем печь с изделиями – до 550-600 °С. После этого сопловое устройство с размещенной внутри стружкой титана нагревают до 400-500 °С. Открывают затвор контейнера с иодом. Иод, взаимодействуя с титановой стружкой, образует иодиды титана различной валентности. Полученную смесь иода и иодидов титана направляют к изделиям, проводят травление в течение 50 мин. Затем повышают температуру изделий до 1050-1150 °С и проводят осаждение карбида титана в течение 1 ч. Полученные покрытия толщиной 8 мкм имеют хорошую адгезию и увеличивают стойкость режущих пластин.

Пример 3. Нанесение покрытия из сложных карбидов титана и ванадия. Режущие пластины из сплава Т15К6 подвергают травлению иодом в смеси с иодидами ванадия по методике, указанной в примере 2. Стружку титана, смешанную со стружкой ванадия в соотношении 1 : 5, выдерживают при более высокой температуре (800-900 °С) вследствие низкой летучести диодида ванадия. Осадки толщиной 5-20 мкм, как и в предыдущих примерах, получаются равномерными, беспористыми, прочно сцепленными с основой. Они представляют собой сплав карбидов титана и ванадия переменного состава.

С помощью приемов, аналогичных описанным в примерах, наносят покрытия ZrC, TaC и др. В качестве исходных реагентов используют пентахлорид ниобия ($NbCl_5$), тетраиодид титана (TiI_4), тетрахлорид циркония ($ZrCl_4$), пентахлорид тантала ($TaCl_5$), дииодид ванадия (VI_2) и др.

Поверхностно-диффузионная карбидизация сложнолегирующими элементами – процесс, в котором диффузионное насыщение поверхностного слоя металла сложными карбидами металлов, например хрома, ванадия, титана, вольфрама и др., сочетается с созданием карбидного покрытия на поверхности металла, в результате чего повышаются износостойкость, теплостойкость и коррозионная стойкость изделия [а. с. 745961 (СССР)].

Нагревая изделия в порошке карбидообразующего металла, галогенида аммония и оксида алюминия, предварительно наносят на поверхность изделий слой органического материала на целлюлозной или белковой основе. Нагрев ведут при температуре 1200-1400 °С.

Сущность способа заключается в том, что при температуре 1200-1400 °С атомы карбидообразующих металлов (например, хром, ванадий, титан, вольфрам и др.) в присутствии галогенида аммония как активатора и противопригарной присадки (оксида алюминия) соединяют с углеродом и другими микроэлементами, входящими в состав органического материала (например, хлопчатобумажной, льняной, шерстяной ткани, кожи, лаков и др.), и образуют сложные кар-

бидные покрытия на поверхности изделий. Одновременно образуют диффузионный карбидный слой в металле изделия, прочно соединенный с природнолегированным карбидным покрытием. Это приводит к повышению износостойкости, теплостойкости и коррозионной стойкости изделий.

Температура ниже 1200 °С недостаточна для протекания процесса образования сложных карбидных покрытий. Температура выше 1400 °С не увеличивает скорость образования покрытий.

Пример 1. Ролики из стали 45 покрывают слоем хлопчатобумажной ткани и помещают в контейнер с порошком, содержащим, % (мас. доля): феррохрома 50; хлористого аммония 5; оксида алюминия 45.

Изделия и насыщающий порошок помещают в стальной контейнер с плавким затвором. Контейнер герметизируют, нагревают до температуры 1300 °С и выдерживают в течении 5 ч. В результате процесса на поверхности возникают сложные карбохромированные покрытия. При испытании роликов установлено увеличение их износостойкости в 2-2,5 раза по сравнению с покрытием, полученным другими способами.

Пример 2. Пластины из стали У8 покрывают слоями шерстяной ткани, шерстяной нити и помещают в контейнер со смесью порошков, содержащей % (мас. доля): феррованадия 50, йодистого аммония 5, оксида алюминия 45. Контейнер герметизируют, нагревают до температуры 1350 °С и выдерживают в течение 5 ч. В результате процесса на поверхности образуются сложные карбованадиевые покрытия. При испытании резцы, оснащенные пластинами, обработанными этим способом, отличались увеличением стойкости в 3-4 раза по сравнению с покрытием, полученным другими способами.

Ниобирование – процесс диффузионного насыщения ниобием поверхностей твердосплавных изделий (особенно режущих инструментов) с целью повышения их эксплуатационной стойкости. Достаточно простой и эффективный способ ниобирования [а. с. 726209 (СССР)] осуществляется в смеси порошков, содержащей, % (мас. доля): оксида ниобия 36-56; алюминия 10-24; хлористого аммония 1-3; окиси алюминия – остальное. Предпочтительный состав, % (мас. доля): окись ниобия 46; алюминия 17; хлористого аммония 2; оксида аммония 35.

Процесс ниобирования проводят при температуре 950-1100 °С в течение 1-6 ч в контейнерах без использования вакуума или защитных атмосфер. На поверхности твердосплавного инструмента формируется износостойкое покрытие, состоящее из карбидов ниобия (NbC и α-Nb_2C) толщиной 7-15 мкм.

Преимущества состава: возможность использования стандартного термического оборудования, обеспечивающего нагрев до температуры 900-1100 °С; более значительное повышение эксплуатационной стойкости режущего инструмента по сравнению со стойкостью инструмента, подвергавшегося ниобированию иными способами.

Пример. Ниобирование деталей из сплава ВК8 проводят при температуре 1100 °С с выдержкой 4 ч в шахтной силитовой печи без использования вакуума или защитных атмосфер. На поверхности твердосплавного инструмента формируется износостойкое покрытие толщиной до 15 мкм.

Сульфидирование – процесс насыщения поверхностных слоев металла серой. Сульфидированию подвергают технологическую оснастку и инструменты, изготовленные из быстрорежущих сталей всех марок и стали типа ХВГ 9ХС, с целью улучшения антифрикционных свойств поверхностей. Для проведения

сульфидирования применяют тигельные ванны. Технологическую оснастку, поступающую на сульфидирование, предварительно обезжиривают. Составы смесей для сульфидирования приведены в табл. 42. Составы № 3, 4, 6, 8 предназначены для обработки технологической оснастки, изготовленной из стали типа ХВГ и 9ХС (рабочая температура сульфидирования 180-200 °С, время выдержки при этой температуре 45-60 мин); составы № 1, 2, 5, 7 – для обработки технологической оснастки из быстрорежущей стали (рабочая температура процесса 550-570 °С, время выдержки 46-90 мин).

После выдержки технологическую оснастку охлаждают на воздухе до нормальной температуры и погружают в горячую воду для полного удаления соли. Затем опускают в подогретое масло, для отпуска через некоторое время выгружают и обтирают ветошью. Поверхность инструментов после сульфидирования серая. Глубина слоя, видимая под микроскопом, равна 0,10-0,13 мм. Образовавшееся на поверхности инструмента сернистое соединение в процессе трения обладает самосмазывающейся способностью. Благодаря этому уменьшаются силы трения деталей трущихся пар или стружки о поверхность режущего инструмента. В результате сульфидирования износостойкость поверхностей увеличивается.

Контроль качества исполнения процесса сульфидирования проводят по образцам-свидетелям.

Сульфоцианирование – диффузионное насыщение металла углеродом, азотом и серой, сопровождающееся образованием сложных химических соединений (карбидов, нитридов и сульфидов железа и легирующих металлов). В сульфоцианированном слое металла у поверхности располагается тонкая (5-15 мкм) светлая зона сульфидов. Степень насыщенности зоны серой может превышать 5%. Ниже расположена темная зона карбонитридов. Глубина этой зоны 50-100 мкм. Далее следует переходная зона с преимущественным преобладанием структур перлитно-ферритного типа.

Процесс применяется для повышения износо- и задиростойкости поверхностей деталей, работающих в условиях усиленного трения и недостаточного смазывания (например, для упрочнения фрикционных дисков). Одновременное насыщение углеродом и азотом повышает износостойкость и сопротивление усталости металла деталей при многократных циклических нагружениях. При не-

42. Составы смесей для ванн при сульфидировании

Номер состава	Содержание, % (мас. доля)											
	KCNS	NaCNS	FeS	FeS_2	$Na_2S_2O_3$	Na_2SO_4	K_2SO_4	$Al_2(SO_4) \times K_2SO_4 \times 24\,H_2O$	$K_4Fe(CN)_6$	NaCl	$BaCl_2$	$CaCl_2$
1	-	-	-	16,6	-	-	-	-	3,4	17	25	38
2	-	-	13,2	-	-	3,4	-	-	3,4	17	25	38
3	90	-	-	-	-	-	10	-		-	-	-
4	60-85	-	-	-	-	-	-	15-40	-	-	-	-
5	4	-	12	-	-	4	-	-	-	17	25	38
6	75	-	-	-	25	-	-	-	-	-	-	-
7	-	40-43	-	-	10	-	-	-	7-10	22	18	-
8	66	-	-	-	-	34	-	-	-	-	-	-

больших скоростях перемещений сульфоцианированные стальные и чугунные детали могут заменить бронзовые детали типа венцов червячных колес, втулок, подшипников скольжения, ползунов кулисных механизмов и т. п.

Сульфоцианирование повышает износостойкость режущих инструментов, изготовленных из быстрорежущих или высокохромистых легированных сталей. Процесс применяют для упрочнения инструментов и технологической оснастки, изготовленных из быстрорежущих сталей всех марок и стали типа Х12, Х12М и др.; для повышения стойкости и качества поверхности деталей. Выполняют в твердых смесях, в расплавах солей, в смесях газов. Составы смесей для жидкостного сульфоцианирования в расплавах солей приведены в табл. 43. Поскольку тиосульфат натрия более активный осернитель, чем сернистый натрий, то предпочтительно использование смесей следующих составов, % (мас. доля): карбамида мочевины 36; поташа 24; желтой кровяной соли 30; тиосульфата натрия 10 или хлористого калия 20; сернокислого натрия 25; тиосульфата натрия 5 и цианистого натрия 50 либо цианистого натрия 95 и тиосульфата натрия 5. Применительно к первому из составов реакции мочевины с поташем приводит к образованию неядовитой модификации цианистого калия:

$$2\,(NH_2)_2CO + K_2CO_3 = 2KCNO + 2NH_3 + CO_2 + H_2O.$$

Тиосульфат натрия, реагируя с цианатом калия, образует роданистый калий (KCNS), являющийся основным осернителем. Цианат калия, диссоциируя, образует соединения, которые, разлагаясь, разлагают азот и углерод, диффундирующие в сталь:

$$4KCNS = K_2CO_3 + CO + 2N + 2KCN + 4S.$$

Атомный углерод выделяется из CO:

$$2CO \rightarrow CO_2 + C_{атом}$$

и вместе со свободным азотом диффузионно насыщает поверхность, образуя в металле карбонитридный слой.

43. Составы смесей для ванн при жидкостном сульфоцианировании

Номер состава	Содержание, % (мас. доля)											
	NaCN	$(NH_2)_2CO$	$K_4Fe(CN)_6$	$Na_2S_2O_3$	Na_2SO_3	Na_2SO_4	$(NH_4)_2SO_4$	K_2S-Na_2S	K_2CO_3	KCl	NaOH а	Na_2CO_3
1	-	54	-	-	-	-	-	2	44	-	-	-
2	50	-	-	5	-	25	-	-	-	20	-	-
3	-	-	75	12	-	-	-	-	-	-	13	-
4	5	55	-	-	3	-	-	-	37	-	-	-
5	95	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-
6	95	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-
7	95	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-
8	34	-	-	-	7	-	-	-	16	-	27	16

Процесс ведут в тигельных печах-ваннах. Перед загрузкой детали очищают и обезжиривают, промывают в растворе щелочи, затем – в теплой воде. После подсушки их подогревают до 150-350 °С и затем с помощью приспособлений погружают в ванну. Рабочая температура ванны 550-570 °С, время выдержки при сульфоцианировании конструкционных сталей равно 2,5-3 ч. Время сульфоцианирования инструментов приведено в табл. 44.

По окончании процесса детали извлекают из ванны и выдерживают над ней до полного стекания раствора солей. Охлаждение деталей проводят на воздухе до температуры 100-150 °С. Затем детали промывают 10-15 мин в горячей воде, переносят в масло с температурой 100-125 °С и выдерживают в нем 10-15 мин. В результате такой обработки повышается коррозионная стойкость сульфоцианированной поверхности. Качество процесса контролируют по образцам-свидетелям, обработанным совместно с деталями. Состав ванны периодически контролируют. Содержание серы в работоспособной ванне должно быть в пределах 0,2-2,0% (мас. доля). Для восполнения количества серы в расплаве перед загрузкой очередной партии деталей необходимо в ванну ввести соли (например, гипосульфит Na_2SO_3) в количестве 10-20% от массы первоначальной загрузки. Сульфоцианированные детали имеют равномерный темно-серый цвет.

Алитирование – диффузионное насыщение металла, преимущественно стали, атомарным алюминием. Стальные алитированные изделия отличаются высокой окалиностойкостью, хорошей сопротивляемостью коррозии, в том числе в морской воде и атмосфере, низкой износостойкостью. Твердость алитированного слоя достигает 500 HV. Процесс выполняют в порошкообразных смесях, в расплавах или металлизацией с последующим отжигом. Режимы алитирования приведены в табл. 45. Тигли для алитирования в расплавах изготовляют из шамота или магнезита. Для предотвращения растворения металла обрабатываемых деталей в расплавленном алюминии в состав ванны вводят 6-8% стальной стружки. Недостатки способа алитирования в расплаве: низкая стойкость тиглей, налипание расплава на поверхность изделия, частичное растворение металла

44. Время τ сульфоцианирования инструментов

Инструмент	Диаметр инструмента, мм	τ, мин	Инструмент	Диаметр инструмента, мм	τ, мин
Сверла	От 10 до 15 Св. 15 » 20 » 20 » 30 30 и более	12 15 18 20	Долбяки	-	10
Развертки и зенкеры	От 10 до 15 Св. 15 » 20 » 20 » 30 30 и более	12 15 18 20	Резцы: зубострогальные проходные и канавочные фасонные итангенциальные	- - -	10-12 15-20 12-20
Метчики	От 10 до 12 Св. 12 » 20 20 и более	5 8 10			
Накатные плашки	-	От 5 до 7	Резьбонарезные несборные фрезы	От 25 до 30 Св. 30 » 50 50 и более	10 12 15

45. Режимы алитирования стали

Способ алитирования	Содержание компонентов в насыщающей среде, % (мас. доля)	Температура, °С	Продолжительность, ч	Глубина слоя, мм	Примечание
В порошкообразных смесях	1. Порошок алюминия 49,5; оксид алюминия 49,5; хлористый аммоний 1,0 2. Ферроалюминий 99; хлористый аммоний 1 3. Ферроалюминий 48; кварцевый песок 48; хлористый аммоний 4 4. Алюминий 25; оксид алюминия 74; хлористый аммоний 1 5. Ферроалюминий 50; оксид алюминия 49; хлористый аммоний 1 6. Ферроалюминий 74; оксид алюминия 25; хлористый аммоний 1	950-1050	6-12	0,25-0,6	Алитирование проводят в железных или нихромовых ящиках. Упаковка ведется так же, как при цементации, в твердом карбюризаторе. Смесь употребляют многократно с добавлением 10-15% свежей смеси
В ваннах с расплавленным алюминием	Расплавленный алюминий 88-92; железо 8-12 (во избежание растворения металла изделий)	720-750	0,25-1,0	0,1- 0,3	На поверхности расплава рекомендуется создавать слой флюса для очистки деталей, удаления налипшего металла и уменьшения разъедания поверхности деталей
Металлизация последующим отжигом	На поверхности изделия напыляют слой алюминия толщиной 0,7-1,2 мм. На него наносится обмазка (50% серебристого графита, 20% огнеупорной глины, 20% кварцевого песка, 10% жидкого стекла)	900-950	2-4	0,2-0,4	Толщина обмазки 0,8-1,5 мм. Обмазка просушивается при температуре 80-100 °С

* Для снижения содержания алюминия в слое и уменшения хрупкости слоя алитированные изделия отжигают при температуре 900-1050 °С в течение 4-5 ч. Глубина алитированного слоя при этом возрастает на 20-40%.

детали и загрязнение ванны. Процесс частично стабилизируется при введении в ванну с расплавом флюсом (табл. 46).

Титаноалитирование – диффузионное покрытие алюминием и титаном поверхностей изделий из стали и чугуна [а. с. 722996 (СССР)]. Предварительно на изделие равномерно толщиной до 0,1 мм наносят смесь, состоящую из 85-90% Al и 10-15% Cu. Затем выполняют отжиг в вакууме при 930-980 °С (время выдержки 4-6 ч). После этого проводят титанирование с использованием металлизатора из губчатого титана, титановой стружки или порошка, добавляя в них интенсификатор хлористый или фтористый аммоний, взятые в соотношении 100 : (0,5-2).

46. Составы флюсов для алитирования в расплаве

Компоненты	Содержание компонентов [% (мас. доля)] в составе		
	1	2	3
Хлористый калий	47	40	40
Поваренная соль	35	40	30
Криолит	12	10	10
Фторид алюминия	6	10	-
Хлористый цинк	-	-	20

Режим титанирования: разогрев реактора до температуры 860-870 °С, время выдержки 0,5 ч, повышение температуры до 950-1000 °С, выдержка 2-3 ч. Вакуум в реакторе 1,3 Па.

Выдержка при температуре 860-870 °С при титанировании способствует образованию эвтектики Ti_2Cu_3. В результате этого происходит заполнение пор в диффузионном покрытии.

Пример. Изделие из серого чугуна СЧ21 очищают и обезжиривают. На поверхность электрометаллизатором наносят попеременно слои алюминия и меди толщиной 0,1 мм. Отжиг осуществляют в предварительно вакуумированной (1,3 Па) герметичной реторте при 950 °С в течение 4 ч.

Для титанирования используют губчатый титан фракции 12-6 мм в смеси с фтористым аммонием в соотношении 100 : 1. Режим титанирования: реактор разогревают до температуры 860 °С с изотермической выдержкой 30 мин, затем повышают температуру до 1000 °С с последующей изотермической выдержкой 4 ч. Разрежение в реакторе 1,3 Па. В результате процесса на поверхности детали образуется плотное диффузионное титановое покрытие толщиной до 1,8 мм. Концентрация титана в составе покрытия на поверхности изделия составляет 86-96%.

Силицирование – диффузионное насыщение поверхностного слоя стали кремнием. Силицированный слой обладает повышенной стойкостью против коррозии в морской воде и кислотах, а также повышенной износостойкостью при достаточно низкой твердости (200-250 HV). Процесс выполняют в порошкообразных смесях, жидких или газовых средах. Режимы силицирования приведены в табл. 47.

47. Режимы силицирования стали

Содержание компонентов в насыщающей среде, % (мас. доля)	Температура, °С	Продолжительность, ч	Глубина слоя, мм	Примечание
Силицирование в порошкообразных смесях				
Ферросилиций 75; шамот или оксид алюминия 20; хлористый аммоний 5	1100-1200	6-12	0,15-0,8	-
Газовое силицирование				
Газовая фаза, образующаяся при введении хлора в среду, загруженную изделиями и ферросилицием (или карбидом кремния)	950-1050	2-5	0,4-0,8	Процесс ведут в муфельных печах. Количество карбида кремния или ферросилиция – 1/10 массы деталей

Для силицирования в порошкообразных смесях детали упаковывают в металлические ящики, заполненные рабочей смесью, и помещают в печь, нагретую до температуры 950-1100 °С. Продолжительность времени выдержки для получения силицированного слоя заданной глубины зависит от температуры процесса и размеров ящика. Ориентировочно можно считать, что для ящиков средних размеров при температуре 1100 °С за 6 ч глубина образующегося силицированного слоя достигает 0,15 мм. Силицирование в жидкой среде выполняется в расплаве солей хлористого бария и хлористого натрия (1 : 1) с добавлением ферросилиция (20% общей массы солей). В таком расплаве при температуре 1000 °С на детали из низкоуглеродистой стали за 2 ч создается силицированный слой глубиной до 0,35 мм. Процесс осуществляется в электродных печах-ваннах.

Силицирование в газовых средах проводят в хлоре, смесях хлора и водорода, а также азота и водорода. Источником атомарного кремния служат ферросилиций, карбид кремния (SiC), тетрахлорид кремния ($SiCl_4$) и моносилан (SiH_4). Наиболее часто газовое силицирование проводят в среде хлора или смеси хлора и водорода в печи с вращающейся ретортой. В реторту загружают обрабатываемые детали, карбид кремния или ферросилиций. Количество карбида кремния (или ферросилиция) составляет 10% массы загруженных деталей. Температура процесса 950-1050 °С. После нагрева до рабочей температуры в реторту подается газ, например хлор. Хлор взаимодействует с кремнием, образуя хлорид кремния ($SiCl_2$), а затем атомарный кремний:

$$SiCl_2 + Fe = FeCl_2 + Si_{атом};$$
$$2SiCl_2 \rightarrow SiCl_4 + Si_{атом}.$$

Количество хлора, подаваемого в реторту, влияет на качество обрабатываемых изделий. Избыток хлора приводит к разъеданию поверхности деталей и к возникновению реакций, понижающих давление в рабочем пространстве печи. При нормальном ходе процесса давление в реторте равно 100-500 Па. Ориентировочно можно считать, что на 1 $м^2$ поверхности обрабатываемых деталей в рабочем пространстве печи должно быть израсходовано 10-20 л хлора.

Обработка быстрорежущего инструмента в атмосфере пара

Окончательно изготовленный инструмент подвергают обработке в атмосфере пара по следующей технологической схеме: обезжиривание в течение 10-15 мин при температуре 70 °С в ванне с раствором следующего состава, кг/л воды: углекислая сода Na_2CO_3 0,02-0,04; каустическая сода NaOH 0,02-0,04; тринатрийфосфат Na_3PO_4 0,02-0,04; промывка в горячей воде; подогрев до температуры 340-380 °С в герметичной камере электропечи с выдержкой 15-30 мин; продувка камеры паром в течение 20-30 мин для полного удаления воздуха; подогрев до температуры 540-560 °С в электропечи с выдержкой 30-40 мин; охлаждение на воздухе до температуры 50-70 °С; обработка в масле при температуре 50-70 °С с выдержкой 5-10 мин.

В результате обработки паром на поверхности окончательно изготовленного инструмента образуется черная с синим оттенком пористая оксидная пленка толщиной до 0,006 мм. Она хорошо удерживает охлаждающие и смазывающие жидкости и затрудняет налипание стружки на режущие грани. В производствен-

ных условиях для обработки инструмента паром можно использовать шахтную электропечь, оборудованную сварным муфелем и перфорированным змеевиком, или в специальные установки (рис. 27). При обработке паром инструмент в зависимости от конфигурации укладывают на стеки или подвешивают. В результате отпуска, осуществляющегося при обработке инструмента паром, в металле уменьшаются напряжения, образующиеся при шлифовании. Стойкость инструмента, обработанного паром, возрастает в среднем в 1,5 раза; значительно повышается его коррозионная стойкость.

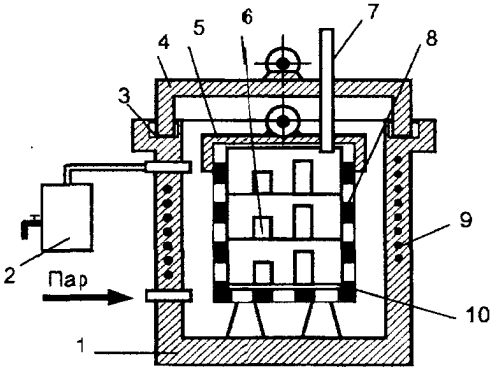


Рис. 27. Схема установки для обработки деталей в атмосфере пара: 1 – электропечь; 2 – водяной конденсатор; 3 – песочный затвор; 4 – крышка печи; 5 – крышка сварного муфеля; 6 – детали; 7 и 9 – термопары; 8 – сварной муфель с отверстиями; 10 – сетка

Интенсификация процессов диффузионного насыщения

Интенсифицировать процессы диффузионного насыщения металлов, в том числе увеличить толщину карбидных покрытий, снизить температуру и время их формирования, можно, нанося на упрочняемую поверхность изделия химическим путем никель-фосфорное или кобальтофосфорное покрытия [а. с. 578363 (СССР)]. После этого нагревают обрабатываемые изделия при температуре 800-1000 °С в течение 1-6 ч в порошковых насыщающих средах. Способ позволяет получить карбидные слои толщиной до 70-80 мкм. Например, при предварительном нанесении никель-фосфорного или кобальтофосфорного покрытия и последующем диффузионном насыщении стали 45 в смеси состава, % (мас. доля): Al_2O_3 38;Al 12; Cr_2O_3 48; NH_4Cl 2 (хромоалитирование) скорость насыщения и толщина слоя в зависимости от температуры насыщения изменяются (табл. 48).

Скорость диффузионного насыщения карбидами, нитридами, боридами и иными сложными соединениями можно увеличить активным перемешиванием насыщающей среды с помощью ультразвука, пульсирующих потоков инертных газов или газов, содержащих активные вещества, присутствующие в рабочем составе насыщающей смеси или способствующие их возникновению в процессе реакции.

В соответствии с пат. 2416272 (Франция) (метод диффузионной поверхностной обработки металлических деталей в ванне расплавленных солей) в ванну с расплавом солей погружают полностью или частично обрабатываемую металлическую деталь. Через перфорированные трубы или пористую керамику со дна ванны

48. Характеристики процесса диффузионного насыщения стали 45 с предварительно нанесенным химическим покрытием

Предварительное нанесение покрытия	Режим обработки		Толщина слоя, мкм
	Температура, °С	Время насыщения, ч	
Никель-фосфорного	800 950 950	6 6 0,5	30-35 70-80 25-30
Кобальтофосфорного	800 950	6 0,5	25-30 20-25

подается смесь горячих газов (образующих в жидкой соли мелкие пузырьки), активизирующая процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя детали. В зависимости от вида химико-термической обработки (ХТО) – цементации, азотирования, сульфидирования или борирования – в состав активирующих газов могут входить оксид углерода, метан, пропан и другие углеводороды; азот или преимущественно аммиак, а также смесь аммиака с углеводородами; сероводород или хлористая сера; треххлористый бор. В качестве газов-носителей активного вещества в смесях могут быть использованы инертные или активные газы – азот, аргон, водород или гелий. Из примеров, приведенных в описании к патенту, следует, что метод обеспечивает получение за 2 ч обработки толщину цементованного слоя, равную 0,8 мм, нитроцементованного 0,6-0,7 мм (твердость 700 HV), борированного 20-40 мкм (твердость 1500 HV). Метод ускоряет процесс химико-термической обработки и повышает стабильность качества упрочненного слоя деталей.

Для интенсификации процесса диффузионного насыщения, создания равномерного покрытия при парогазовом насыщении металлических изделий и уменьшения расхода насыщающих веществ на парогазовую смесь дополнительно воздействуют ультразвуковыми колебаниями резонансной частоты, подаваемыми на экран, который предварительно вводят в застойную зону контейнера [а. с. 588259 (СССР)]. Наличие "озвученного" экрана интенсифицирует движение активной парогазовой смеси и соответственно ее взаимодействие с поверхностью детали.

Классификация методов получения покрытий с использованием представлений термодинамики необратимых процессов

К.т.н. В.В. Тарапатой предлагается классификация методов нанесения покрытий, которая позволяет на основе оценочного подхода обобщить и оптимизировать их выбор.

Эффективность и надежность работы современных транспортных средств во многом определяется технологией упрочнения рабочих поверхностей при их изготовлении и восстановлении. В подавляющем большинстве случаев в основе упрочнения лежат процессы переноса вещества на поверхность детали из какого-либо источника. Вполне очевидно, что они относятся к категории необратимых процессов, обеспечивающих направленный поток материала с целью достижения заданных размеров, формы и свойств поверхности. Важная роль в упрочнении принадлежит химико-термической обработке (ХТО).

Известные в настоящее время классификации методов химико-термической обработки в качестве основного признака используют число насыщающих элементов (одно-, двух- и более компонентная ХТО), их химическую природу (цементация, азотирование и т.п.), фазовый состав насыщающей среды (из твёрдой, жидкой или газообразной фазы) и прочие параметры процессов. Общий термодинамический подход применяется очень ограниченно – лишь для оценки вероятности протекания того или иного химического процесса на поверхности насыщаемой детали – и совершенно не отражает технологии его реализации.

В то же время термодинамика достаточно эффективно используется при прогнозировании поведения уже нанесенных покрытий непосредственно в эксплуатации: при изнашивании, окислении и т.п. Таким образом, между принятием решения о нанесении покрытия и его эксплуатацией существует неоправданный логический провал, затрудняющий оценку как самого покрытия в целом, так и целесообразности применения данной технологии его получения.

В основу предлагаемой классификации (табл. 49) процессов нанесения покрытий положено число градиентов (сил), которые прямо или косвенно создают направленные на упрочняемую поверхность потоки вещества. Таким образом, следует различать методы нанесения покрытий с использованием одного, двух, трех и т.д. градиентов (сил). При этом интенсивность потока будет определяться числом действующих сил, их величиной и значениями феноменологических коэффициентов, а соответствующее дифференциальное уравнение указывает на имеющиеся пути управления процессом.

Вполне очевидно, что при наложении нескольких полей увеличивается гибкость в управлении потоком наносимого вещества и становится возможной не только интенсификация процесса нанесения покрытия, но и получение каких-либо новых свойств воспринимающего поток объекта. При совпадении обоих этих направлений эффективность процесса оказывается наибольшей, при отсутствии – приходится искать компромисс.

Рассмотрим изложенный принцип применительно к процессам химико-термической обработки (табл. 49). При наличии только одной термодинамической силы – градиента химического потенциала, – приведенное уравнение (1) известно как закон Фика:

$$J_D = L_{DD}\frac{\partial \mu}{\partial x},$$

где J_D – диффузионный поток, вызванный градиентом концентрации химического вещества; L_{DD} – феноменологический коэффициент диффузии.

При термо- и электродиффузии, когда действуют уже две силы, зависимость усложняется и приобретает соответственно вид:

$$J_{D(\mu,T)} = L_{DD}\frac{\partial \mu}{\partial x} + L_{DQ}\frac{\partial T}{\partial x}; \quad J_{D(\mu,U)} = L_{DD}\frac{\partial \mu}{\partial x} + L_{DE}\frac{\partial T}{\partial x},$$

где $J_{D(\mu T)}$ и $J_{D(\mu U)}$ – потоки вещества, вызванные термо- и электродиффузией; L_{DD} и L_{DQ} – коэффициенты взаимности Онзагера, отражающие влияние градиента температуры или электрического потенциала на диффузионный поток вещества.

49. Классификация способов химико-термической обработки по числу используемых в процессе насыщения градиентов (сил)

Число сил	Способ ХТО	Создаваемые градиенты	Средства управления градиентом	Примеры практического использования
Одна	В порошках		Состав порошковой смеси	Цементация стали, силицирование ниобия
	В расплавах металла или соли		Состав ванны	Хромирование и цементация стали
	В вакууме (однозонный)		Состав засыпки	Силицирование молибдена, хромирование стали
	В газовой среде		Состав газа	Цементация и хромирование стали
Две	Из обмазок с нагревом ТВЧ	$\frac{\partial \mu}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial x}$	Состав обмазки, скорость нагрева	То же
	В газовой среде (двухзонный)		Состав газа (засыпки). Разность температур	Силицирование молибдена и ниобия
	Электролизом расплавов солей	$\frac{\partial \mu}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial x}$	Состав ванны, плотность тока	Борирование стали
Три	В тлеющем разряде	$\frac{\partial \mu}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial x}$	Состав порошковой смеси, разность температур образца и порошковой смеси, плотность тока (удельная мощность)	Азотирование стали, силицирование молибдена и ниобия
	Газовый циркуляционный	$\frac{\partial \mu}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial x}$	Состав порошковой смеси, разность температур образца и порошковой смеси, скорость продувки газа	Силицирование молибдена, хромирование стали и молибдена

Примечание: Для всех перечисленных способов насыщения к числу средств управления градиентами относятся также температура и длительность процессов.

Если в системе идет термоэлектродиффузия (ХТО в тлеющем разряде), то диффузионный поток вещества можно выразить обобщённой формулой, представляющей собой математическую модель процесса переноса вещества на насыщаемую поверхность:

$$J_D = L_{DD}\frac{\partial \mu}{\partial x} + L_{DQ}\frac{\partial T}{\partial x} + L_{DE}\frac{\partial U}{\partial x}.$$

Принципиально важным является то обстоятельство, что в такой системе, наряду с диффузионным потоком насыщающего элемента, в соответствии с принципом Онзагера возникают также потоки теплоты J_Q и электричества J_E. Первый экспериментально обнаружить трудно, т.к. он сливается с теплотой, под-

водимой извне или выделившейся при химических реакциях. Наличие же потока электричества было четко зафиксировано. Поэтому система с тремя термодинамическими силами в целом должна описываться следующей системой уравнений:

$$J_D = L_{DD}\frac{\partial \mu}{\partial x} + L_{DQ}\frac{\partial T}{\partial x} + L_{DE}\frac{\partial U}{\partial x};$$

$$J_Q = L_{QD}\frac{\partial \mu}{\partial x} + L_{QQ}\frac{\partial T}{\partial x} + L_{QE}\frac{\partial U}{\partial x};$$

$$J_E = L_{ED}\frac{\partial \mu}{\partial x} + L_{EQ}\frac{\partial T}{\partial x} + L_{EE}\frac{\partial U}{\partial x}.$$

Появление дополнительных сил, например, градиента давления, $\frac{\partial p}{\partial x}$ приведет к появлению новых слагаемых в уравнении потока вещества и соответствующему изменению числа и структуры всех уравнений, описывающих потоки в системе.

Для решения получаемых таким образом систем уравнений необходимо знание законов распределения в исследуемой области химического и электрического потенциалов, температуры и др., а также численных значений феноменологических коэффициентов. Ограничения, налагаемые на них в соответствии со вторым законом термодинамики, позволяют найти их путем "изоляции", т.е. устранения всех термодинамических сил, кроме той, коэффициент при которой определяется в настоящее время. Реально этого можно достичь разработкой и созданием соответствующих экспериментальных установок.

Таким образом, предлагаемый принцип классификации методов нанесения покрытий с использованием градиентов действующих полей позволяет ликвидировать отмеченный выше разрыв в использовании термодинамики, создать математическую модель конкретного процесса переноса вещества на насыщаемую поверхность и определить пути его оптимизации. Данный подход приемлем, по-видимому, не только для ХТО, но и для других методов: наплавки, осаждения гальванических покрытий и т. п.

Пример. Для получения равномерного покрытия на деталях сложной геометрической формы, изготовленных из стали 45, экран помещают в застойной зоне негерметичного контейнера. Над деталью устанавливают пластинчатый экран. С помощью трансформатора скорости ультразвуковые волны направляют на экран и вызывают его колебания. Контейнер помещают в печь, предварительно разогретую до температуры 1000 °С. Процесс диффузионного насыщения проводят в течение 3 ч. Рентгенографические и спектральные исследования показывают наличие равномерного распределения насыщающего элемента по всей поверхности детали. Металлографические исследования определяют наличие равномерного диффузионного слоя (420-360 мкм), отличающегося однородностью по всей поверхности детали.

Обработка этим методом позволяет без существенных затрат повысить равномерность покрытий при химико-термической обработке деталей и использовать преимущество парогазового насыщения (высокая чистота обрабатываемой поверхности, неизменность размеров деталей) для обработки крупногабаритных деталей в контейнерах с большими градиентами состояния актив-

ной смеси. Метод диффузионной обработки деталей позволяет экономить ресурсы, дает возможность заменить дорогостоящие сплавы, расходуемые для изготовления деталей.

Сокращение времени обработки и повышение стабильности свойств при диффузионном насыщении металла может быть также достигнуто переменным пульсирующим давлением, создаваемым струей насыщающего газа, нагретого до температуры обработки и подаваемого в рабочую зону с частотой, пропорциональной отношению температуропроводности материала в глубине насыщаемого слоя [а. с. 815078 (СССР)].

Этот способ обеспечивает создание условий для максимального контакта и высокую скорость реакции при взаимодействии насыщающего элемента с поверхностным слоем изделия. В результате происходит ускорение диффузионных процессов в поверхностном слое металла за счет термоциклирования и приложения переменного пульсирующего давления насыщенного газа.

Глава 5
УПРОЧНЕНИЕ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ И РАСТВОРЕНИЯ

Хромирование

Твердое износостойкое электролитическое хромирование применяют для повышения износостойкости и восстановления деталей машин, контрольного, измерительного и режущего инструмента, а также формообразующих элементов штампов и пресс-форм, дыропробивных пуансонов и матриц. Типовой технологический процесс хромирования выполняют по схеме: электрохимическое анодное либо химическое обезжиривание; промывка в теплой воде, промывка в холодной воде; декапирование; промывка в холодной воде; анодная обработка; хромирование; улавливание хрома из электролита; обработка в растворе метабисульфита натрия; промывка в холодной воде, сушка; обезводороживание (по мере надобности). Хромируемую поверхность предварительно шлифуют или полируют.

Электрохимическое обезжиривание проводят под воздействием постоянного тока в щелочных растворах следующего состава, кг/л воды: едкий натр 0,025-0,035; сода кальцинированная 0,025-0,035; тринатрийфосфат 0,010-0,020; жидкое стекло 0,003-0,005. Аноды изготовляют из никелированной или обычной стали, а также никеля. Процесс электрохимического обезжиривания проводят при температуре 80-90 °С, плотности тока 500-1000 А/м^2 и напряжения источника тока 12 В. Продолжительность обработки на катоде составляет 1,5-3 мин, на аноде – 0,5-1 мин. При обработке в барабанах напряжение на источнике тока устанавливается 16 В; продолжительность обработки на катоде в этом случае составляет примерно 5 мин. Составы растворов для химического обезжиривания и режимы обработки приведены в табл. 1.

Промывку в воде проводят для удаления с деталей продуктов реакции или растворов, оставшихся на поверхности после электрохимического обезжирива-

1. Составы растворов и режимы химического обезжиривания

Номер состава	Содержание кг/л воды				
	Едкого натра	Кальцинированной соды	Тринатрий-фосфата	Эмульгатора ОП-7 или ОП-10	Сульфонола
1	0,01 – 0,02	-	0,01 – 0,02	0,002 – 0,004	-
2	0,004 – 0,06	-	-	0,002 – 0,004	-
3	-	0,05	-	-	0,05

Номер состава	Режим обработки			
	Температура, °С	Продолжительность, мин	Давление, МПа	Способ обработки
1	60-70	1-3	0,2-0,3	Струйный
2	60-70	5-10	-	Погружением
3	70-95	5-15	-	»

ния, декапирования и обработки хромированных деталей в растворе метабисульфита натрия.

При повышенном количестве солей жесткости в водопроводной воде (свыше $15\text{-}10^{-6}$ кг/л) последнюю промывку перед хромированием и перед сушкой следует проводить в конденсате или деминерализованной воде. Детали промывают водяным душем или их погружением в ванну, оборудованную устройством для перемешивания деталей и раствора с помощью воздуха. Допускается применение обоих способов: сначала – погружением, а затем – под душем. При двукратной промывке погружением после декапирования подачу воды осуществляют каскадно (противотоком), чистую воду подают только во вторую промывную ванну, из которой она самотеком перетекает в первую ванну. В канализацию воду следует спускать из первой ванны. Режимы промывки приведены в табл. 2.

В тех случаях, когда упрочняемая поверхность после обезжиривания остается загрязненной окалиной, ржавчиной, оксидами, ее подвергают травлению.

Для **травления** черных металлов применяют растворы серной или соляной кислоты, иногда – смесь этих растворов (табл. 3).

2. Режимы промывки в воде

Вода	Режим промывки	
	Температура, °С	Продолжительность, мин
Холодная (водопроводная питьевая или деминерализованная)	10-25	0,15-3
Теплая (водопроводная питьевая, конденсат или деминерализованная)	50-60	0,15-3
Горячая (водопроводная питьевая, конденсат или деминерализованная)	80-90	0,15-3

3. Растворы для химического травления стали и чугуна

Компонент раствора	Содержание, г/л	Температура, °С	Область применения
1. Серная кислота Катапин Синтанол ДС-10 или сульфонол НП-3	150-250 3-5 3-5	40-80	Для травления стали и чугуна
2. Серная кислота Соляная кислота Уротропин Сульфонол НП-3	175-200 80-100 40-50 3-5	40-50	
3. Соляная кислота	150-350	15-45	Для бесшламного травления сталей
Уротропин Соляная кислота Катапин	40-50 200-220 5-7	15-30	Для травления поверхностей первого-второго класса точности
4. Серная кислота Иодистый калий Катапин	100-200 0,8-1,0 8-10	60-80	То же, с участием окалины

Продолжение табл. 3

Компонент раствора	Содержание, г/л	Температура, °С	Область применения
5. Серная кислота Соляная кислота	15-20 35-40	60-70	Для травления термообработанных углеродистых сталей
6. Едкий натр Азотнокислый натрий	400-600 100-200	135-145	Для разрыхления окалины на термообработанных стальных пружинящих изделиях

Примечание. Продолжительность обработки устанавливается в зависимости от характера и толщины слоя окислов.

При травлении растворяются как оксиды, так и сам металл. В последнем случае выделяется водород, который диффундирует в металл, увеличивая его хрупкость.

Для предотвращения растворения основного металла в травильные растворы вводят ингибиторы (катапин, уротропин и др.).

Травление коррозионно-стойких сталей наиболее часто проводят в растворах, приведенных в табл. 4. Термообработанные изделия травят только после разрыхления окалины.

Снятие травильного шлама. При травлении сталей на их поверхности остается *шлам*, который должен быть удален специальными растворами (табл. 5) перед нанесением гальванических покрытий.

4. Растворы для травления коррозионно-стойких сталей

Компонент раствора	Содержание, г/л	Температура, °С	Продолжительность, мин	Применение
1. Едкий натр Азотнокислый натрий	400-600 200-250	135-145	30-150	Для разрыхления окалины
2. Марганцево-кислый калий Едкий натр	35-50 140-250	От 80 до температуры кипения	30-90	
Фтористоводородная кислота	15-50			
Азотная кислота	50-150	15-30	До 60	Для удаления окалины со сталей 12Х18Н9Т
Азотная кислота Фтористый натрий Хлористый натрий	220-240 20-25 20-25	15-30	До 60	
Соляная кислота	90-110	40-45	10-15	Для последовательной обработки сталей 20Х13
Серная кислота Азотная кислота Соляная кислота	350-450 70-90 70-90	40-45	1-2	

5. Растворы для снятия травильного шлама

Компонент раствора	Содержание, г/л	Температура, °С	Продолжительность, мин	Обрабатываемая сталь
Азотная кислота Серная кислота	70-80 80-100	15-30	До 0,8	Углеродистая
Серная кислота Хромовый ангидрид Хлористый натрий	15-30 70-120 3-5		5-10	Средние- и низколегированная
Фтористоводородная кислота	4-5			Коррозионностойкая
Азотная кислота	350-400		1-20	Любая
Едкий натр*	50-100	60-80	1-3	

* Для анодного снятия шлама при плотности тока 5-10 А/дм^2 с использованием стальных катодов.

Декапирование, или активация поверхности. Для обеспечения прочного сцепления покрытия с основным металлом применяют легкое травление (химическое или электролитическое) – *активацию поверхности,* или декапирование (табл. 6).

После активации детали быстро промывают в проточной воде и переносят в гальваническую ванну для нанесения покрытий.

Твердое износостойкое хромирование проводят в стандартном универсальном разведенном электролите различной концентрации либо в саморегулирующемся. Состав электролитов и режимы обработки приведены в табл. 7.

Скорость хромирования (выход хрома по току) можно ускорить [а. с. 264094 (СССР)]. При хромировании в потоке стандартного электролита (например, в обычном сульфатном, тетрахроматном или др.) скорость потока электролита поддерживают в пределах 1-5 м/с при плотности тока 200-2000 А/дм^2 и соотношении между этими величинами от 1 : 200 и до 1 : 40. При этом выход хрома по току составляет 45-60% и более чем в 10 раз возрастает скорость осаждения хромового покрытия. Полученные по описанному способу осадки хрома имеют высокое качество и микротвердость 1050-1150 HV.

Перед хромированием изделия необходимо прогревать непосредственно в ванне для хромирования, а затем анодно декапировать в течение 0,5-1 мин при плотности тока 3500-4000 А/м^2. При хромировании изделий сложной формы на 1-2 мин увеличивают плотность тока в 2 раза.

6. Режимы химического декапирования

Содержание кислоты, кг/л воды	Режим декапирования	
	Температура, °С	Продолжительность, мин
H_2SO_4 0,4-0,6	18-25	0,25-3
HCl 0,09-0,11		0,25-0,5

7. Составы электролитов, режимы обработки, материал анодов для хромирования

Электролит	Содержание, кг/л					
	CrO_3	H_2SO_4	K_2SiF_6	$SrSO_4$	H_3BO_3	$NaSiF_6$
Разведенный	0,125-0,200 0,120-0,150	(1,25÷2,00) 10^{-3} (1,00÷1,50) 10^{-3}	- -	- -	- -	- -
Универсальный	0,200-0,300 0,200-0,250 0,300-0,350	(2,00÷3,00) 10^{-3} (2,5÷2,5) 10^{-3} -	- - -	- - -	- (20÷25) 10^{-3} -	- - (6÷8) 10^{-3}
Саморегулирующийся	0,250-0,300 0,200-0,300 0,250	- - -	0,008 0,018-0,020 0,020	6,0 · 10^{-3} (5,5÷6,5) 10^{-3} 6,0 · 10^{-3}	- - -	- - -

Электролит	Режим обработки		Скорость осаждения хрома, мкм/мин	Материал анодов
	Температура, °С	Плотность тока, А/м²		
Разведенный	45-60	4500-6000	0,6	Сплав свинец – сурьма (Sb до 8%) или свинец – олово (Sn до 10%)
	45-55	3000-4000	-	Свинец (для внутренних фигурных анодов), сталь (для внутренних анодов при хромировании узких отверстий)
Универсальный	45-55	2000-5500	0,2-0,7	Сплав свинец – сурьма (Sb до 8 %) или свинец – олово (Sn до 10%), свинец (для внутренних фигурных анодов), сталь (для внутренних анодов при хромировании узких отверстий)
Саморегулирующийся	55-60 50-60 55-65	5000-8000 5000-8000 4000-8000	1,0 - -	Сплав свинец – олово (Sn до 10%)

Толщина наносимого хромового покрытия составляет, мкм: 30-100 для гладких мерительных инструментов; 2-20 для резьбовых калибров; 40-100 для пресс-форм, матриц и пуансонов. Износостойкость режущего инструмента в результате хромирования увеличивается в 2-3 раза, контрольно-измерительного инструмента – в 5-10 раз. Микротвердость осаждаемого хрома 900-1000 HV.

После хромирования необходимо улавливать хром из электролита, промывая детали в течение 0,15-3 мин в ванне с непроточной водой без подогрева. Получающиеся концентрированные растворы добавляют в ванну хромирования. При накоплении в растворе более 0,001 кг/л воды трехвалентного хрома раствор меняют. Водопроводную воду, имеющую жесткость более 15 × 10 кг/л воды, для промывки деталей после хромирования использовать нельзя; вместо нее применяют конденсат или деминерализованную воду. Хромированные детали после промывки в ванне следует обработать в течение 0,15-1 мин в 15%-ном растворе метабисульфита (пиросульфита) натрия, который восстанавливает оставшийся на поверхности деталей шестивалентный хром до трехвалентного, в результате чего предотвращается попадание шестивалентного хрома в сточные воды. Для удаления с деталей влаги, которая остается на их

поверхности после промывки в воде, проводят сушку. Способы и режимы сушки приведены в табл. 8.

Детали технологической оснастки из легированных сталей подвергают термической обработке для снятия напряжений, возникающих в результате наводороживания. Процесс ведут при температуре 180-200 °С в течение 1,5 ч преимущественно в масляной ванне.

Хромирование проводят в стационарных стальных ваннах, футерованных листовым винипластом. Обрабатываемые изделия служат катодом. В качестве источников тока применяют низковольтные генераторы постоянного тока, вырабатывающие ток напряжением 6; 12 или 9 В и силой 250-10 000 А. Для электропитания ванн применяют также селеновые выпрямители, состоящие из понижающего трансформатора и набора селеновых выпрямительных шайб.

Для загрузки изделий в ванну используют специально контактные приспособления (рис. 28) – подвески, барабаны. При конструировании и изготовлении подвесок необходимо учитывать следующие основные требования к ним: материал подвесок (электролитическая медь) должен иметь такое сечение, при котором обеспечивается подвод тока соответствующей силы; подвеска должна иметь хороший контакт с покрываемыми деталями и катодной штангой ванны; детали в подвесках должны быть расположены так, чтобы они не экранировали одна другую, а образовавшиеся газы легко удалялись от поверхности деталей, не создавая "газовых мешков"; для устранения возможности покрытия подвески осаждаемым металлом она должна быть покрыта изоляционным материалом, за исключением мест контакта (табл. 9); конструкция подвески должна способствовать рациональному использованию объема ванны; монтаж и демонтаж деталей с подвесок должен выполняться без затруднений.

8. Рекомендуемые режимы сушки хромированных деталей

Способ сушки	Температура, °С	Продолжительность, мин
Обдувка сжатым воздухом	18-25	0,5-3
В сушильном шкафу	85-100	5-10

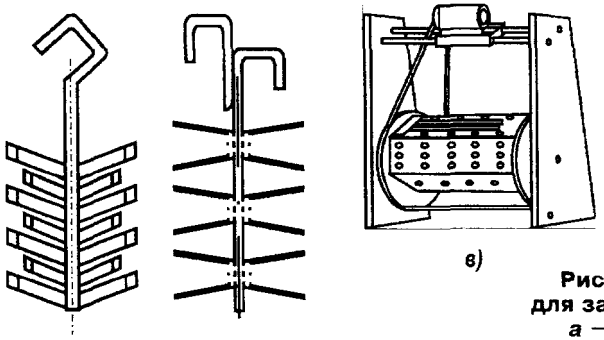


Рис. 28. Приспособления для загрузки деталей в ванну: *а* – штыревая подвеска; *б* – пружинная подвеска; *в* – переносный винипластовый барабан с электроприводом

9. Материалы для изоляции поверхностей, не подлежащих покрытию хромом

Изолирующий материал	Среда	Температура, °С	Нанесение покрытия	Способ удаления
Мастичные				
Натуральный воск 37,5-65% Парафин 12,5-25% Канифоль 5С-10%	Кислые и щелочные электролиты	35	Наносят 1-2 слоя кистью, шпателем или окунанием при температуре состава 80-90 °С. Сушить на воздухе	Основная часть мастики снимается в кипящей воде, остатки – в растворе ТМС-31 (50-80 г/л) при температуре 70-80 °С в течение 1-2 мин
Натуральный воск 50-70% Канифоль 30-50%				
Канифоль 33,3% Церезин 30% Парафин 36,7%				
Пленочные				
Грунт ХСГ-26	Кислые и слабощелочные электролиты	35	Наносить в 3-4 слоя пульверизатором или окунанием с промежуточной сушкой каждого слоя в течение 10-20 мин при температуре 45-55 °С	Основная часть изоляции отделяется после обработки в горячей воде, остатки изоляции снимаются в органическом растворителе
Эмали ПХВ-1, ПХВ-29, ХСЭ-23, ХСЭ-26				
Лаки ХСЛ – ХВЛ-21, растворитель РМ				
Лак АК-113ф, растворитель 647 Клей БФ-4, растворитель этиловый спирт	Щелочные электролиты и органические растворители	80	Окончательная сушка – при комнатной температуре от 1 до 3 ч в зависимости от материала	Основная часть изоляции отделяется после обработки в горячей воде, остатки изоляции снимаются в органическом растворителе
Нитроклей АК-20, растворитель РДВ или ацетон	Кислые электролиты	98	После высыхания слой изоляции должен образовывать ровную гладкую пленку без морщин, оспин, потеков	Снимается при погружении в горячую (температура ~90 °С) ванну, остатки изоляции снимаются в соответствующем растворителе
Эпоксидный лак ЭП-730, растворитель – ацетон, резиновый клей, пластироль "Диаплазоль-2А"	Цианистые электролиты	40		
Специальные накладки				
Винипласт, плексиглас, целлулоид, коррозионностойкая сталь, полиэтиленовые и хлорвиниловые пленки	Кислые электролиты	100	Закрываются поверхности, не подлежащие покрытию	Снимаются вручную

В производственных условиях возникает необходимость в местном электролитическом хромировании безванным способом крупногабаритных деталей (валов, цилиндров, штоков и др.); исправлять дефекты на хромовом покрытии

(сколы, риски, непокрытые участки) без его полного снятия и повторного нанесения, а также восстанавливать изношенные поверхности до первоначальных размеров. Например, для выполнения местного хромирования изношенной шейки вала изготовляют цилиндрический анод из стали Х18Н10Т, который монтируют на вал, подлежащий хромированию (рис. 29). Изоляцию анода от детали выполняют винипластовыми прокладками. В полость, образованную анодом, поверхностью вала и специальным поддоном, заливают электролит, предварительно уложив уплотнения из резины.

Хромирование вала проводят в потоке электролита, который подают в полость из небольшой стационарной емкости через верхний патрубок с помощью кислотостойкого насоса; сливают электролит через нижний патрубок. Во избежание перегрева электролита в процессе электролиза анод охлаждают подачей холодной воды противотоком в полость анода со скоростью 0,5 л/мин. При площади хромирования, например, равной 0,2 м^2, объем полости с охлаждающей водой равен 15 л, с электролитом 75 л. Перед хромированием рабочую поверхность обрабатывают резанием до получения параметра шероховатости *Ra* 0,63 мкм.

Перед нанесением покрытия поверхность обезжиривают бензином и кашицей из венской извести, промывают проточной водой. Устанавливают приспособление на вал, проверяют надежность изоляции между приспособлением и деталью с помощью омметра; вал и приспособление подключают к источнику тока. Окончательно обезжиривают место на валу, подлежащее хромированию, протирая его салфетками – сначала смоченной спиртом, а затем сухой. Полость между приспособлением и поверхностью вала заполняют электролитом, циркулирующим без наложения постоянного тока. Одновременно нагревают вал до 50 °С, например, подачей горячего воздуха в его внутреннюю полость или иным способом. Температуру в процессе электролиза поддерживают охлаждением анода.

Перед хромированием проводят анодное декапирование в течение 30-40 с при плотности тока А/дм^2, затем включают прямой ток (80 А/дм^2) на 1-2 мин. Режим нанесения износостойкого хромирования: плотность тока 35-40 А/дм^2, температура электролита 46-53 °С. Продолжительность хромирования в стандартном электролите устанавливают из расчета скорости осаждения хрома толщиной 1 мкм в течение 2,6 мин.

После хромирования получают гладкий, равномерный, хорошо сцепленный с основным металлом осадок хрома толщиной от 50 до 150 мкм. Для местного хромирования применяют стандартный электролит (250 г/л хромового ангидрида, 2,5 г/л серной кислоты) или электролит следующего состава, г/л: хромовый ангидрид 450-500; сернокислый кобальт 20-25; фтористый кальций 90-100; алюмокалиевые квасцы 8-10.

Хромовое покрытие, осажденное из электролита, беспористое,

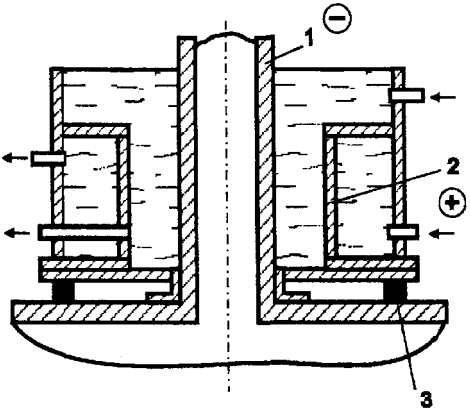


Рис. 29. Схема монтажа анода при хромировании шейки вала: 1 – хромируемая часть вала; 2 – полый цилиндрический анод; 3 – прокладки

при толщине слоя 50 мкм имеет хорошую адгезию, легко полируется. Скорость осаждения хрома в электролите 60 мкм/ч. Микротвердость покрытия 537-559 HV. Электролит устойчив в работе, не требует предварительной проработки, достаточно производителен, добавки в него недефицитны.

При контроле качества хромированных изделий проверяют внешний вид, прочность сцепления с основным металлом и толщину покрытия. Твердость и износостойкость покрытия контролируют при наличии указаний на чертеже или карте технологического процесса изготовления детали или инструмента. Контроль внешнего вида покрытия выполняют поштучно осмотром деталей невооруженным глазом, используя в отдельных случаях эталоны сравнения. На поверхности покрытия деталей не допускается наличие трещин, сколов, сквозных черновин, отслаиваний, дендритов. Допускаются разнотолщинность и разнотонность цвета покрытия на различных участках поверхности.

Контроль толщины хромовых покрытий проводят приборами, не разрушающими покрытия, в местах, наиболее затрудненных для прохождения тока и осаждения на них металла: на центральных участках плоскостей, вогнутых поверхностях, участках, близких к внутренним углам, и т. п. Толщина покрытия на указанных участках должна быть не менее предусмотренной стандартами или техническими требованиями чертежа. Изделия с толщиной покрытия, меньшей допустимой, отправляют на повторное хромирование.

Причины и способы устранения дефектов хромирования в сульфатных электролитах приведены в табл. 10.

После хромирования целесообразно проводить обезводораживание высокопрочных сталей, сталей, склонных к водородному охрупчиванию, при температуре 170-180 °С в течение 1-1,5 ч.

10. Причины и способы устранения дефектов при хромировании в сульфатных электролитах

Дефект покрытия	Причина возникновения	Способ устранения
Отслаивание хромового покрытия вместе с никелевым	Плохая подготовка поверхности перед никелированием	Улучшить качество подготовки поверхности
	Нарушение режима никелирования	Устранить неполадки перед никелированием
Отдельные участки поверхности деталей не покрывают хромом	Низкая плотность тока	Увеличить ток на ванне
	Экранирование отдельных участков поверхности деталей, скопление газа при хромировании	Перераспределить детали на подвеске, устранить экранирование, изменить расположение деталей в ванне
	Наличие отверстий вблизи непокрытых мест	Отверстия закрыть свинцовыми пробками
Отдельные точки на хромированной поверхности	Поры и раковины в основном металле	Улучшить механическую подготовку деталей
Подгар на выступающих участках и краях деталей	Высокая местная плотность тока	Снизить среднюю плотность тока или защитить выступающие участки экранами
Высокое напряжение на ванне	Образование толстой пленки на анодах	Удалить пленку с анодов

Продолжение табл. 10

Дефект покрытия	Причина возникновения	Способ устранения
Темный осадок, прекращение осаждения хрома, растворение свинцовой футеровки	Присутствие азотной кислоты	Проработать электролит в течение 3-4 ч при высоких плотностях тока, при большой концентрации азотной кислоты сменить электролит
Темный цвет покрытия	Недостаточный нагрев деталей	Обеспечить нормальный прогрев деталей
	Недостаточная концентрация серной кислоты	Добавить необходимое количество серной кислоты
Темный осадок, образование пятен	Повышенное содержание трехвалентного хрома	Увеличить отношение площади анодов к площади деталей
	Повышенное содержание железа	Провести частичную замену электролита
Быстрое увеличение концентрации трехвалентного хрома	Неправильно выбрано соотношение площадей катода и анода	Увеличить анодную или уменьшить катодную поверхность
Отсутствие покрытия на внутренних участках поверхности деталей	Неправильно установлены дополнительные аноды	Устранить дефекты монтажа деталей и анодов

Никелирование

В типовой технологический процесс *электролитического никелирования* входят следующие операции: обезжиривание в органическом растворителе; сушка или обезжиривание химическое; промывка в теплой воде; обезжиривание электрохимическое; промывка в теплой воде; промывка в холодной воде; декапирование; промывка в холодной воде; никелирование электрохимическое; улавливание, промывка в холодной воде; промывка в горячей воде; сушка, контроль. Никелируемую поверхность предварительно шлифуют или полируют.

Для снятия различных полировальных и шлифовальных паст, масел, смазочных материалов, находящихся на поверхности деталей, проводят обезжиривание в органических растворителях (бензине, уайт-спирите, керосине) путем последовательного погружения в одну-три емкости, под душем или протиркой волосяными щетками либо ватным тампоном. После обезжиривания в бензине рекомендуется сушка на воздухе, а после обработки уайт-спиритом – промывка в горячей воде. Для износостойкого никелирования применяют сульфатные электролиты. Составы электролитов и режимы обработки приведены в табл.11.

Составы электролитов для матового и блестящего никелирования даны в табл. 12 и 13. При приготовлении электролита каждый из его компонентов предварительно растворяют в воде, переливают растворы в рабочую ванну и доливают ее водой, затем определяют pH и доводят его до заданного значения, добавляя серную кислоту и углеродистый никель. Микротвердость осаждаемого никеля составляет 250-300 HV.

Для повышения износостойкости рабочей поверхности штампов и обеспечения ее постоянной смазки применяют способ их покрытия электролитическим осаждением твердого пористого слоя сплава никеля с кобальтом, с последующими операциями расширения пор в покрытии и его пропитки политетрафторэтиленом. Такое покрытие имеет твердость 750 HV, коэффициент трения 0,05. Оно

11. Составы электролитов и режимы никелирования

Электролит	Содержание, г/л воды				
	Сернокислого никеля, *1	Сернокислого натрия *2	Хлористого натрия	Хлористого никеля	Фтористого натрия
Сернокислый (типовой)	175-200	80-160	20	-	-
То же, скоростной	420	150	5	30	-
То же, блестящего никелирования	200-400	-	5-15	-	5
Борфтористоводородный	-	-	-	-	-
Сульфаминовый	-	-	-	250-300	-

Электролит	Содержание, г/л воды				Режим работы		
	Натриевой соли *3	Борфтористоводородного никеля	Сульфаминовокислого никеля	Борной кислоты	pH	Температура, °С	Плотность тока, А/дм²
Сернокислый (типовой)	-	-	-	20	5-5,5	18-25	0,5-1,0
То же, скоростной	-	-	-	50	2,0-3,5	50-60	До 10
То же, блестящего никелирования	2-4	-	-	30	5,8-6,3	45-55	1-3
Борфтористоводородный	-	300	-	30	2,7-3,5	25-50	5-10
Сульфаминовый	2-3	-	250-350	25-30	3,5	25-30	10-15

*1 Никелевый купорос
*2 Десятиводный
*3 Дисульфат натриевой кислоты

12. Составы электролитов матового никелирования

Номер состава	Содержание, г/л воды							pH
	Сернокислого никеля	Сернокислого магния	Сернокислого натрия	Хлористого магния	Хлористого натрия	Хлористого аммония	Борная кислота	
1	175-200	-	90-100	-	20-25	-	25-30	5,4-5,8
2	130-150	30-50	100-120	-	10-15	-	25-30	5,2-5,6
3	120-240	-	-	-	20-25	-	20-30	4,5-5,5
4	65-70	До 10	-	-	-	32-35	До 10	-
5	140-160	10-20	До 100	20	10-20	-	20-30	4,2-4,6

увеличивает срок службы штампов и пресс-форм, защищает поверхность от повреждений и заеданий, устойчиво к кислотам и щелочам, эффективно для штампов горячей и холодной штамповки.

Пресс-формы и литейные формы (например, из стали 4Х4ВМФС) для литья под давлением деталей из алюминиевых сплавов (например, АЛ2) рационально упрочнять осаждением 9-12 мкм сплава никель-вольфрам. Повышается износостойкость поверхности цилиндров двигателей и поршневых колец при гальваническом нанесении слоя композиционного покрытия, состоящего из никелевой матри-

цы, содержащей мелкодисперсные частицы карбида кремния. Покрытие имеет твердость около 550 HV и толщину 30-70 мкм. Для создания такого покрытия в электролит вводят в виде суспензии 2,5-5% мелкодисперсных (менее 4 мкм) частиц карбида кремния твердостью около 2500 HV. Процесс проводится при катодной плотности тока 5 А/дм^2, температуре электролита 60 °С; материал анодов – никель НПА1. Составы электролитов для комплексного никелирования приведены в табл. 14.

13. Составы электролитов блестящего никелирования

Номер состава	Содержание, г/л воды			
	Сернокислого никеля	Дисульфонафталиновой кислоты (2,6-2,7 г/см^3)	Хлористого натрия	Борной кислоты
1	200-250	1-2	20-25	25-30
2	250-300	1-5	10-15	30-40
3	250-300	-	10-15	30-40

Номер состава	Содержание, г/л воды			pH
	Сернокислого натрия	Фтористого калия (натрия)	Прочих компонентов	
1	-	5-6	Формалин (40%-ный) 1-2	5,5-5,8
2	50-60	3,5	-	-
3	-	0,5-1,0	Паратолуолсульфамид 2; кумарин 0,5-1,0; препарат "Прогресс" 0,1-0,5	4,5-5,5

14. Составы электролитов комплексного никелирования

Назначение электролита	Номер состава	Содержание, г/л раствора			
		Борфтористого никеля	Борной кислоты	Сернокислого никеля	Сернокислого кобальта
Борфтористоводородное никелирование	1	300	30	-	-
	2	100	30	-	-
Осаждение сплава никель-кобальт	1	-	20-25	-	110-120
	2	-	25-30	140-160	100-108
	3	-	25	140	100
	4	-	30	200	19
Осаждение сплава никель-вольфрам	1	-	-	20	-
	2	-	-	15	-

Назначение электролита	Содержание, г/л раствора			pH
	Хлористого калия	Вольфрамовокислого натрия	Прочих компонентов	
Борфтористоводородное никелирование	-	-	Борфтористоводородная кислота 40	2,7-3,5
	-	-		2,3-3,5
Осаждение сплава никель-кобальт	10-15	-	Хлорный никель 130-140	4-5
	13-15	-	-	4,8-5,2
	-	-	-	-
	-	-	хлористый натрий 15	-
Осаждение сплава никель-вольфрам	-	50	Лимонная кислота 70	8
	-	100	Щавелевокислый аммоний 45	9

Многократное повышение термической стойкости формообразующих элементов пресс-форм при нанесении вольфрамоникелевого покрытия обусловлено аморфной структурой покрытия. Благодаря этому в поверхностном слое по границам зерен не происходит выделения хрупких интерметаллических соединений железа с алюминием, которые являются источником образования разгарных трещин. Не возникает взаимодействия покрытия с углеродом, содержащимся в смазочных материалах, с образованием хрупких углеродсодержащих соединений, так как никель (металл-растворитель) не является карбидообразующим элементом. Высокие твердость и пластичность вольфрамоникелевого покрытия пресс-форм при литье под давлением деталей из алюминиевых сплавов обеспечивают надежную защиту формообразующих элементов от механического изнашивания, возникновения сетки разгара и термических трещин.

После никелирования необходимо улавливать никель из электролита и обезвреживать его. После промывки детали сушат. Режимы и способы выполнения этих операций, а также составы ванн для их выполнения аналогичны применяемым при хромировании. Контроль качества никелевых покрытий проводят по следующим основным показателям: внешний вид, толщина покрытия, отсутствие пор и прочность сцепления с основным металлом. Методы контроля аналогичны используемым при хромировании.

Основные причины и способы устранения дефектов электролитического никелирования приведены в табл. 15.

15. Причины возникновения и способы устранения дефектов электролитического никелирования

Дефект покрытия	Причина возникновения	Способ устранения
Матовое никелирование		
Никель осаждается, поверхность изделий покрывается пятнами	Низкая плотность тока или низкая температура электролита	Повысить плотность тока или температуру электролита
Грубое шероховатое покрытие, точечная пятнистость	Загрязнение электролита примесями, анодным шламом	Профильтровать электролит, добавить окислитель, применить движущиеся катоды
Отслаивание, растрескивание и хрупкость покрытия	Плохая подготовка поверхности, низкая температура электролита, загрязнение его техническими примесями	Соответственно улучшить подготовку поверхности, повысить температуру электролита, профильтровать его
Пористость покрытия	Наличие в электролите железа, высокая плотность тока, повышенная кислотность	Удалить железо, снизить плотность тока или кислотность, ввести антипиттинговые добавки "Прогресс" или "Сульфирол"
Подгар покрытия (серое шероховатое покрытие на углах и выступающих частях изделия)	Высокая плотность тока, низкая температура электролита	Снизить плотность тока, поддерживать температуру электролита не ниже 18 °С
Желтый оттенок покрытия	Низкая кислотность электролита	Повысить кислотность электролита
Отсутствие покрытия, обильное выделение на катоде	Высокая кислотность электролита	Понизить кислотность с помощью раствора едкого натра
Пассивирование анодов, запах хлора, падение напряжения	Высокая анодная плотность тока	Добавить хлориды, очистить аноды, увеличить их поверхность

Продолжение табл. 15

Дефект покрытия	Причина возникновения	Способ устранения
Черный цвет покрытия	Наличие в электролите цинка	Удалить цинк
Образование питтинга	Загрязнение электролита органическими примесями	Подкислить электролит, добавить H_2O_2 и снова защелочить
Блестящее никелирование		
Недостаточный блеск	Понижение концентрации блескообразователей	Откорректировать электролит, добавив блескообразователи
Недостаточный блеск	Несоответствие плотности тока или pH раствора	Откорректировать плотность тока и величину pH
Недостаточное время выравнивания	Пониженная концентрация бутиндиола	Добавить бутиндиол
Покрытие блестящее, но хрупкое	Недостаточное содержание добавки, уменьшающей внутренние напряжения (например, сахарина, монохлорамина Б)	Ввести дополнительно соответствующие добавки (сахарин и др.)
	Накопление продуктов разложения блескообразователей	Очистить электролит от органических примесей
На выступающих участках и краях деталей пригоревший осадок	Избыток блескообразователей	Снизить концентрацию блескообразователей с помощью активированного угля или проработкой электролита током
Темный оттенок покрытия	Наличие примесей	Удалить примеси

Для нанесения никелевых покрытий могут быть использованы *бесцианистые электролиты,* в которых химические процессы осуществляются без применения токсичных веществ. Ниже приведены составы некоторых бесцианистых электролитов и режимы процессов электролитической упрочняющей обработки.

Аммиакатно-уротропиновый электролит цианирования содержит, г/л: оксида цинка 40-60; хлористого аммония 240-260; уротропина 40-60; мездрового клея 2-4; водного аммиака 100-200.

Режимы работы: температура (20 ± 5) °С; катодная плотность тока 1-2 А/дм^2; pH = 8,0 ÷ 8,4.

Скорость осаждения при плотности тока 1 А/дм^2 1 мкм за 3,5 мин.

Электролит обеспечивает большую рассеивающую способность, чем распространенные в промышленности хлораммиакатные электролиты, достаточно высокую плотность тока (1-2 А/дм^2) и выход по току 95-98%. Прост в изготовлении, стабилен в работе.

Сульфатно-аммониевый электролит кадмирования содержит, г/л: сернокислый кадмий 40-60; сернокислый аммоний 204-260; диспергатор НФ-Б 50-100 мл/л; уротропин 15-20; вещество ОП-10 0,7-1,2.

Режим работы: катодная плотность тока, 0,8-1,2 А/дм^2, температура (20 ± 5) °С, pH = 4 ÷ 6. скорость осаждения при плотности током 0,8 А/дм^2 – 1 мкм за 3 мин. Катодный и анодный выходы металла по току составляют примерно 100%. Покрытия, полученные с применением этого электролита, мелкозернистые, плотные, с высокой коррозионной стойкостью. Диспергатор НФ-Б (ГОСТ 6848-79)

представляет собой конденсат бетасульфокислоты нафталина с формальдегидом, нейтрализованный аммиачной водой.

Сульфатно-трилоновый (нитрилотриуксуснокислый) электролит кадмирования содержит, г/л: сульфата кадмия 40-50, трилона А 100-110, едкого калия 100-110. Режим работы: катодная плотность тока 1-4 А/дм^2, температура 50-55 °С, pH = 11 ÷ 11,5. Скорость осаждения при плотности тока 1 А/дм^2 21 мкм/ч. Загрузку деталей проводят под током.

Из растворов оптимальных составов при оптимальных режимах электролиза осаждаются высококачественные кадмиевые покрытия в интервале плотности тока 1-8 А/дм^2 с выходом по току. По рассеивающей способности электролит не уступает цианистому.

Электролит трифосфатного цинкования содержит, г/л: сернокислого цинка, кристаллогидрата 60-70, пирофосфорнокислого калия, кристаллогидрата 350-380, фосфорнокислого аммония двузамещенного 45-55, сульфониловой кислоты 0,2-0,8; pH = 8,5 ÷ 9,5. Катодная плотность тока 1-2 А/дм^2 18-25 °С; 2-4 А/дм^2 при температуре 35-40 °С. Время осаждения 1 мкм цинка составляет 2,2 мин при плотности тока 2 А/дм^2 либо 1,1 мин при плотности тока 4 А/дм^2; pH = 8,5 ÷ 9,5.

Этилендиаминовый электролит меднения содержит, г/л: сернокислой меди 100-125, этилендиамина (100%) 50-60, сернокислого натрия 50-60, сернокислого аммония 50-60. Режим работы: температура меднения (20 ± 5) °С, pH = 8,2 ÷ 8,5, катодная плотность тока 0,5-1,0 А/дм^2, отношение анодной поверхности к катодной 2:1. Выдержка до получения осадка толщиной 3-4 мкм. Доращивание необходимой толщины медного покрытия производится из сернокислого электролита. Для улучшения качества сцепления осадка с основой выполняют операцию предварительного меднения в тартратном электролите состава, г/л: сернокислая медь 3-5, едкий натр 80-100, сегнетова соль 30-50. Режим работы: температура (20 ± 5) °С, катодная плотность тока 4-6 А/дм^2. Детали выдерживают в указанном составе без тока в течение 20-30 с, затем под током в течение 1-1,5 мин.

Рекомендуется также *железистосинеродистый электролит меднения* состава, г/л: сернокислая медь (в пересчете на металл) 15-30, железистосинеродистый калий 180-250, едкий кали 7-25, сегнетова соль 90-100. Режим работы: температура (55 ± 5) °С, катодная плотность 1,5-2,0 А/дм^2, отношение анодной поверхности к катодной 6:1. При плотности тока 2 А/дм^2 скорость осаждения составляет 1 мкм за 1,5 мин.

В качестве покрытия для стальных деталей применяют *биникель*, который можно наносить, исключая подслой меди. Процесс никелирования по схеме "биникель" заключается в последовательном нанесении полублестящего и блестящего никелевых покрытий из растворов соответственно составов 1 и 2, г/л:

1) сернокислый никель 250-350, борная кислота 30-40, хлористый натрий 10-20, 1,4-бутиндиол 0,08-0,12 мл/л, формалин 0,1 мл/л; режим работы: температура (40 ± 5) °С, pH = 5,1-4-5,4, катодная плотность тока 2-3 А/дм^2, скорость осаждения 1 мкм за 2,5 мин при плотности тока 2 А/дм^2;

2) сернокислый никель 250-300, хлористый натрий 10-15, фтористый натрий 1-2, борная кислота 30-40, 1,4-бутиндиол 0,5-1,0 мл/г, формалин 0,03-0,35 мл/л, хлорамин Б 1-2 мл/л; режим работы: температура (55 ± 5) С, pH 4 ÷ 4,5, катодная плотность тока 3-5 А/дм^2, скорость осаждения 1 мкм/мин при плотности тока 5 А/дм^a.

Двойное никелевое покрытие почти в 2 раза коррозионно-устойчивее однослойного такой же толщины. Для увеличения коррозионной стойкости крепежных деталей применяют защитные гальванические покрытия в сочетании с различными пропитками и тонкопленочными ингибитированными покрытиями. В институте химии и химической технологии АН Литвы разработан ряд составов пассивирования типа Ликонда: для голубого пассивирования – Ликонда 22; для радужного – Ликонда 23, Ликонда 1, Ликонда 2; для зеленого – Ликонда 41; для прямого черного – Ликонда 31. Высокопроизводительный процесс блестящего цинкования выполняют с помощью Ликонды ZnSR. Гальванические осадки цинка, полученные по этому процессу, пластичные, выровненные, с бледно-голубым пассивированием. Раствор содержит цинк, хлористый аммоний и блескообразователи: Ликонда ZnSR-A, Ликонда ZnSR-B, Ликонда ZnSR-C. Выпуск составов Ликонда освоен в промышленном масштабе и внедрен для получения преобразующего покрытия на оцинкованных и кадмированных изделиях.

Высокой коррозионной стойкостью обладают следующие покрытия: в особо жестких условиях – кадмиевое, пропитанное раствором оливкового цвета, танина, а также раствором, содержащим Ликонду 41; в жестких условиях – цинковое, пропитанное танином; цинк-фосфатное в сочетании с тонкопленочным покрытием Мовиль. Коррозионная стойкость покрытий усиливается ингибированными смазками УСП, СЗГ-1, ХБГ-3. Составы электролитов и режимы осаждения покрытий приведены в табл. 16.

16. Составы электролитов и режимы антикоррозионной обработки

Покрытие	Состав электролита, г/л	Режим обработки	Дополнительная обработка		
			Вид обработки	Состав электролита, г/л	Режим
Кадмиевое	Сернокислый кадмий 50; серная кислота 50; сернокислый натрий 50; гидролизный спирт 10; столярный клей 5	Плотность тока 5 А/дм^2; температура 20 °С	Хромирование оливкового цвета	Бихромат натрия 30; азотнокислый натрий 30; муравьиная кислота 50 мл/л; ледяная уксусная кислота 40 мл/л; формалин 15 мл/л	pH 1,4 – 2,7; температура 25 °С; время 5с
			Танином	10 %-ный раствор	Температура 25 °С
			В растворе Ликонда 41	-	То же
Цинковое	Сернокислый цинк 60; хлористый аммоний 240; борная кислота 20; столярный клей 1	Плотность тока 1,5 А/дм^2; температура 20 °С	Хромирование оливкового цвета	То же, что для кадмия	pH 1,4 – 2,7; температура 25 °С; время 5 с
			Танином	10 %-ный раствор	Температура 25 °С; время 5 с
			В растворе Ликонда 41	-	Температура 25 °С; Время 5 с

Продолжение табл. 16

Покрытие	Состав электролита, г/л	Режим обработки	Дополнительная обработка		
			Вид обработки	Состав электролита, г/л	Режим
Цинковое Ликонда	Хлористый цинк 100; хлористый аммоний 200; Ликонда-А 50 мл/л; Ликонда-В 5 мл/л.	Плотность тока 1 А/дм^2; температура 20 °С	Осветление с хромированием	Хромовый ангидрид 150; азотная кислота 100; серная кислота 20	Температура 20 °С; время 3 с
Цинкофосфатное	Сернокислый цинк 120; хлористый аммоний 250; борная кислота 25; фосфорнокислый двузамещенный натрий 65; ортофосфорная кислота 30	Плотность тока 0,6 А/дм^2; температура 25 °С	-	-	-
Тонкопленочное ингибитированное	НГ-216А НГ-216Б Мовиль	Температура 98 °С	-	-	-

Электрофоретическое осаждение

Электролитическое *композиционное покрытие* с металлической или полимерной матрицей (основой), армированной дисперсными частицами упрочняющего материала, образуется при осаждении порошковых покрытий на рабочих поверхностях стальных деталей сложной конфигурации, например, деталей пресс-форм, штампов, мерительного инструмента, гидрораспределительных устройств, различной технологической оснастки. Технологический процесс нанесения покрытия безвольфрамового твердого сплава на основе карбида хрома с никель-фосфорной связкой состоит из двух основных операций электрофоретического осаждения смеси порошкообразных компонентов покрытия и припекания электрофоретического осадка к стальной подложке, осуществляемого при 1160-1180 °С в защитной безокислительной среде или в вакууме.

Покрытие имеет высокую адгезию к подложке; разрушение покрытия при деформации происходит раньше, чем отслоение его от подложки. Ввиду того, что коэффициенты термического расширения материала покрытия и стали приблизительно одинаковы, в случае необходимости можно проводить термическую обработку деталей с покрытием по обычным режимам, не опасаясь растрескивания покрытия. Это, а также высокая жаростойкость покрытий позволяют использовать их для защиты деталей, испытывающих одновременное воздействие механических нагрузок, высокой температуры и абразивной среды. Максимальная толщина электрофоретического карбидохромового покрытия составляет 120-150 мкм. Многократным нанесением можно довести толщину покрытия

до 400-500 мкм. Карбидохромовое покрытие примерно в 7 раз превосходит по износостойкости при трении без смазочного материала износостойкость инструментальной стали ХВГ.

Для нанесения покрытия можно использовать тонкие порошки титана, карбида титана, гидрата титана или смеси на основе одного из этих веществ с добавлением до 20% карбида молибдена, до 30% карбидов тантала, ниобия, гафния, циркония, хрома, ванадия и до 50% черных металлов. При упрочнении изделий из всех материалов, кроме порошковых, в основной порошок добавляется порошок угля. Из порошка смеси, полученного в шаровой мельнице влажным способом и высушенного, приготовляют суспензию на основе воды или углеводородов.

В ванну с суспензией погружают изделие и металлическую пластину. Их соединяют с различными полюсами источника постоянного тока напряжением от десятков до сотен вольт. В ванне происходит электрофорез, под действием которого порошок из суспензии осаждается на изделие, образуя покрытие толщиной от единиц до сотен микрон. В суспензию можно добавлять вещество, способствующее образованию коллоидного ионогенного соединения, например, альгинат натрия, кальция, магния или аммония, нитрат алюминия или другие соли азотной и серной кислот. Добавление таких веществ позволяет при низком напряжении электрофореза (несколько десятков вольт) получить покрытие с повышенной адгезией. После осаждения покрытия изделие извлекают, высушивают на воздухе и помещают в печь, где выдерживают при температуре 1200-1300 °С в вакууме (1,3 Па), восстановительной или нейтральной атмосфере, в результате чего в зоне перехода от покрытия к изделию образуется слой сплава металла покрытия и основного металла.

Электрофоретическое осаждение покрытия системы карбид вольфрама – кобальт – бор выполняют с использованием постоянного тока в суспензии, содержащей масс. доли: твердосплавной основы WC-Co-B 350-380; хлористого алюминия 0,25-0,3; ацетилацетона 0,8-3,0; этиленгликоля 100-120; этилцеллюлозы $(3 \div 5)\ 10^{-4}$. Напряженность электрического поля 250-300 В/см; скорость осаждения до 23-24 мкм/с или 17 $м^2/(с \cdot см^2)$; время осаждения 30-180 с; температура электролита 20-100 °С. Концентрация порошка твердого сплава ВК-15 20-70%. Состав дисперсной фазы по плотности, $кг/м^3$: WC $15{,}63 \cdot 10^2$; Co $8{,}8 \cdot 10^2$; B 2,34; размер частиц, мкм: WC 1-5; Co 1; B 1,0.

Электрохимическое полирование

Электрохимическое полирование – один из наиболее эффективных методов повышения стойкости, например, инструментов, благодаря уменьшению шероховатости поверхности, снижению коэффициента трения инструмента об обрабатываемые детали и стружку, ликвидации прижогов. Сущность процесса – анодное растворение металла в электролите.

При шлифовании поверхностей деталей часто наблюдается появление прижогов и микротрещин, что вызывает местные напряжения и преждевременный выход детали из строя. Дефекты могут быть устранены электрохимическим полированием, снимающим поверхностный дефектный слой и формирующим поверхность повышенной чистоты. Преимущество метода – высокая производительность, не зависящая от физико-механических свойств обрабатываемого материа-

ла и формы изделия. Статические характеристики металла – предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение – практически не изменяются. Основное отличие поверхности, полированной электрохимическим способом, от обработанной резанием – отсутствие следов деформации, прижогов и структурных изменений. Растворение гребешков металла уменьшает параметр шероховатости поверхности на 1-2 мкм и изменяет характер микрорельефа. При сопряжении электрополированных поверхностей фактическая опорная поверхность возрастает, что оказывает положительное влияние на работу деталей в условиях трения. Электрохимическое полирование способствует стабилизации коэффициента трения, уменьшает время приработки трущихся поверхностей в 5-6 раз, повышает стойкость металла к коррозии, увеличивает срок службы деталей.

Электрохимическое полирование повышает стойкость сверл на 30-35%, зенкеров на 10-20%, разверток на 20-25%, метчиков до 70%, концевых фрез до 100%.

Упрочняемые инструменты укладывают на медную сетку, соединенную с положительным полюсом источника постоянного тока, и погружают в электролитическую ванну, через которую пропускают электрический ток при напряжении 8 В в течение 20-45 с. Время выдержки зависит от размера упрочняемого инструмента и марки материала. Выделяющиеся в процессе работы газы отсасывают при помощи системы вентиляции. Электролит периодически очищают от шлама.

Перед полированием детали и инструмент термически обрабатывают. После обезжиривания их промывают в горячей и холодной воде, декапируют, вновь промывают и погружают в ванну травления. Для травления сталей типов 65Г и 40Х применяют серно-кислый раствор состава: серная кислота 18-20%; присадка ЧМ 0,8 г/л (основание хинолинового ряда); температура раствора 50-60 °С; время травления 15-20 мин. После травления детали промывают в растворе, содержащем, % (мас. доля): ортофосфорной кислоты 45; серной кислоты 39; хромового ангидрида 4; вода – остальное. Плотность раствора 1,7-1,74 г/дм^3, температура 70-80 С; продолжительность выдержки 6 мин (катоды свинцовые). Затем инструмент или детали промывают в горячей и холодной проточной воде. Для полного удаления следов кислот проводят нейтрализацию в растворе углекислого натрия – 20-30 г/л в течение 0,15-3 мин, после чего их снова промывают в холодной и горячей проточной воде и сушат.

Для полирования инструментов из быстрорежущих и углеродистых сталей можно применить двухкомпонентный электролит состава, % (мас. доля): ортофосфорной кислоты 88 (плотность 1,6 г/см^3); хромового ангидрида 10; вода – остальное. Электрохимическое полирование осуществляют в специальных ваннах с паровым подогревом, электропитание – от источника постоянного тока напряжением до 36 В.

Электролиты для электрополирования не универсальны. Их полирующая способность к различным металлам ограничена. Подбор электролитов и режимов электрополирования для многокомпонентных легированных сталей выполняют с учетом содержащихся в них присадок металлов, вызывающих значительные отклонения электрохимических параметров анодной обработки по сравнению с чистым железом. Это приводит к избирательному растворению участков металла, различных по своим свойствам.

На качество полирования влияют микроскопические неоднородности, возникающие из-за наличия в металле нескольких кристаллических фаз и особен-

но неметаллических включений. Оптимальные режимы электрополирования предварительно определяют потенциостатическим методом в стеклянной электрохимической ячейке на потенциостате П-5848. Для электрода сравнения используют стандартный хлорсеребряный электрод, в качестве вспомогательного – платиновую пластинку. Рабочим электродом служит деталь. Например, в состав твердой заэвтектоидной инструментальной стали ХВСГ, применяемой для изготовления мелкоразмерных плашек и метчиков, входят углерод, хром, вольфрам, кремний, марганец (по 1%), ванадий (0,1%), никель (не более 0,35%), сера и фосфор (не более 0,03%). Одна часть этих элементов образует с углеродом карбиды, другая – твердый раствор в железе. При электрополировании этой стали в результате влияния указанных включений возникают локальные гальванические элементы, которые обычно являются катодами по отношению к основной фазе. Это приводит к растворению основной фазы вокруг частиц катодной фазы, которые, выкрашиваясь, оставляют на полированной поверхности оспины (питтинг).

Высокое качество электрохимического полирования сталей такого типа достигается в электролите, содержащем 25% хромового ангидрида и 75% ортофосфорной кислоты, при температуре 80-100 °С и плотности тока 100-200 А/дм^2. Работа при такой высокой плотности тока осложняет проведение процесса в производственных условиях. Для снижения плотности тока и увеличения электрической проводимости электролита в раствор вводят серную кислоту и воду. Введение 17% серной кислоты и 4% воды повышает электрическую проводимость в 2 раза по сравнению с исходным раствором. При таком содержании дополнительных компонентов рабочая плотность тока имеет минимальные значения.

Оптимальный состав электролита и режим электрополирования плашек из стали ХВСГ, % (мас. доля):

	Оптимальное содержание	Допустимые пределы
Ортофосфорная кислота	60	60 – 65
Серная кислота	17	15 – 20
Хромовый ангидрид	18	15 – 20
Вода	5	2 – 6
Анодная плотность тока, А/дм^2	40 – 60	
Температура, °С	80 – 100	
Время полирования, мин	5 – 10	

Электролит не корректируют по содержанию основных компонентов, если количество пропущенного через него электричества не превышает 240 А ч/л при условии периодического добавления воды до исходного уровня. Дальнейшее увеличение количества электричества связано с необходимостью корректирования и регенерации электролита удалением железа и окисления трехвалентного хрома до шестивалентного. Для осаждения железа предварительно восстанавливают Fe^{3+} до Fe^{2+} на свинцовом катоде при плотности тока 0,8-1 А/дм^2. Анодное пространство отделяют от катодного пористой диафрагмой. Следующая операция – охлаждение раствора до температуры –4 ÷ +4 °С. Соли двухвалентного железа кристаллизуются и выпадают в осадок. После этого проводят окисление Cr^{3+} до Cr^{6+} на свинцовом аноде при плотности тока 2-4 А/дм^2.

При старении электролита уменьшается блеск полируемых деталей, что связано с понижением растворимости продуктов анодного растворения. Поэтому после отработки 240 А ч/л электролит заменяют. Полированные детали нейтрализуют, промывают их в холодной и горячей воде, а затем сушат. Способы устранения возможных дефектов при электролитическом полировании стали приведены в табл. 17.

Электрохимическое полирование изделий из коррозионно-стойких сталей. Предварительно поверхность подвергают виброабразивной обработке на установках типа УВГ-100 с использованием твердого абразивного наполнителя. Режимы полирования следующие: частота колебаний 36,6-38 Гц, амплитуда 1,8-2 мм, продолжительность обработки 4 ч.

Заготовки загружают в барабан, представляющий собой шестигранник, например, со стороной 300 мм и длиной 1000 мм. Барабан заполняют рабочей смесью. В качестве твердого наполнителя используют бой фарфора, керамики и осиновые кубики, в качестве жидкого наполнителя – раствор 75%-ного хозяйственного мыла, кальцинированной соды и воды. Концентрация раствора 0,3-0,5%. Продолжительность обработки 18-20 ч. Электрохимическое полирование осуществляют в стальных ваннах, футерованных свинцом или винипластом. В состав

17. Причины и способы устранения дефектов при электрополировании стали

Вид дефекта	Причина возникновения	Способ устранения
Точечное травление поверхности, питтинг	Присутствие в электролите мельчайших частиц хромового ангидрида	Прогреть электролит при 80-90 °С до полного растворения хромового ангидрида
Неглубокие язвы очертаний	Наличие на поверхности деталей окалины и коррозии	Протравить детали в серной кислоте; в дальнейшем принять меры к недопущению появления на деталях окалины и коррозии
Непрозрачные пленки различного цвета	Состав электролита не оптимальный Плохая промывка деталей после полирования Высокая температура электролита	Сделать химический анализ электролита и откорректировать его Обеспечить тщательную промывку Снизить температуру до оптимальной
Слабый блеск и недостаточное сглаживание шероховатости	Низкая плотность тока	Плотность тока повысить до оптимального значения
Полосчатость	Высокая плотность электролита	Довести плотность электролита до 1,75-1,8
Травление поверхности металла	Низкое содержание окислителя (хромового ангидрида) Накопление железа в электролите Низкая плотность тока	Содержание хромового ангидрида довести до оптимального значения Железо из раствора удалить или разбавить электролит свежеприготовленным Плотность тока повысить до оптимального значения
Пятна в месте контакта	Плохой контакт детали с подвеской	Обеспечить надежный контакт
Черный налет на поверхности детали	Низкая окислительная способность электролита	Увеличить содержание хромового ангидрида до оптимального значения

электролита входят 70% ортофосфорной кислоты, 30% серной кислоты и 3-4 г/л уротропина. Плотность электролита 1,745-1,755 г/см^3, температура электрополирования 44-47 °С, время обработки 5 мин, плотность тока 50-55 А/дм^2. Состав электролита корректируют (при работе в две смены) один раз в неделю. Замену электролита осуществляют после пропускания через 1 л раствора 250 А/ч тока.

Технологический процесс электрохимического полирования обеспечивает создание блестящей коррозионностойкой поверхности.

Электрохимическое оксидирование

Электрохимическое оксидирование применяют для создания неметаллических неорганических покрытий, преимущественно на цветных металлах и сплавах, чаще – на алюминии и его сплавах.

Электрохимическое оксидирование (анодное оксидирование, анодирование) позволяет образовать на поверхности металла оксидную (анодную) пленку одного из трех типов:

1 – тонкую барьерную пленку толщиной 0,1-1 мкм; пленки формируются в электролитах, не растворяющих оксидов; находят применение при изготовлении электроизоляционных материалов;

2 – анодную пленку средней толщины 1-50 мкм; используются главным образом при защите алюминия и его сплавов от коррозии и при декоративной отделке изделий различного назначения;

3 – толстую анодную оксидную пленку толщиной 50-300 мкм; применяют для защиты поверхности от износа и истирания, тепло- и электроизоляции.

Анодная пленка, сформированная на поверхности электрода (детали), состоит из примыкающего к основному металлу тонкого *барьерного слоя* и *пористого наружного слоя*. Пористый слой образуется в результате частичного растворения барьерного слоя под действием электролита. Пористость пленки зависит от агрессивности электролита. Барьерный слой обладает высоким электрическим сопротивлением. Он создает на поверхности, например алюминия, сильный вентильный эффект с удельным сопротивлением 10^{11} Ом·см при пропускании тока в направлении от оксида к алюминию. Поэтому при анодировании практически все падение напряжения определяется сопротивлением барьерного слоя.

Толщина барьерного слоя определяется напряжением процесса. Отношение толщины барьерного слоя к напряжению оксидирования характеризует относительную толщину барьерного слоя. Эта величина не зависит от плотности тока, слабо уменьшается с температурой и несколько меняется при переходе от одного электролита к другому. Предельная относительная толщина барьерного слоя 1,4 нм/В для анодных оксидных пленок, получаемых на чистом алюминии в электролитах, не растворяющих оксид. Для алюминиевых сплавов, оксидируемых в различных электролитах, толщины пленок различны.

Образование анодных оксидных пленок средней и большой толщины обусловлено растворяющим действием электролита на барьерный оксидный слой, который разрушается избирательно. В процессе оксидирования наружный слой утолщается вследствие непрерывного превращения металла в оксид.

Определяющими реакциями при анодном оксидировании алюминия и его сплавов в серной кислоте являются электрохимическое *формирование оксида в барьерном слое и химическое растворение оксида* при воздействии электролита.

Формирование барьерного слоя наблюдается до сравнительно небольших толщин, после чего рост пленки практически прекращается. На практике невыгодно достигать предельных ее толщин, так как при этом скорость роста пленки замедляется, ухудшаются ее механические свойства, возрастают потери тока. Рост плотности тока возможен лишь в ограниченных пределах, выше которых отмечается перегрев анода и, как следствие, снижение толщины пленки.

Наиболее действенным фактором для повышения предельных толщин является снижение температуры процесса, так как анодирование сопровождается значительным выделением тепла. Вблизи барьерного слоя температура поднимается выше 120 °С, а концентрация H_2SO_4 становится более 50%.

Для получения толстых пленок анодирование проводят при охлаждении электролита (0-5 °С) и иногда деталей. Перемешивание электролита несколько улучшает условия электролиза, но не решает проблему получения пленок повышенной толщины. Концентрация серной кислоты влияет в меньшей степени на растворимость оксида алюминия по сравнению с температурой. Для анодного оксидирования алюминия и его сплавов наиболее распространены растворы серной кислоты (табл. 18).

Электролиты выбирают в зависимости от назначения покрытий. Электролит № 1 используют для получения пленок, предназначенных для последующей окраски в органических красителях. Электролиты № 2 и 3 применяют для нанесения оксидных пленок на детали для сборки в узлах различных машин и изделий. В электролитах № 4, 7, 8 и 9 получают износостойкие оксидные пленки с повышенной твердостью. В электролитах № 5 и 6 оксидируют алюминие-

18. Составы электролитов и режимы электрохимического оксидирования (анодирования) алюминия и его сплавов

Номер состава	Компонент электролита	Содержание, г/л	Температура ванны, °С	Плотность тока, А/дм²	Напряжение, В	Время выдержки, мин
1	Серная кислота	180-200	15-23	0,5-2,0	24	15-60
2	Хромовый технический ангидрид Серная кислота	30-55 2-4	20-40	3,0	40	30-60
3	Щавелевая кислота Двухводная сульфосалициловая кислота	27-33 90-110	10-28	1,5-3	До 100	20-120
4	Щавелевая кислота Борная кислота	10-20 1-2	15-25	2,5-3,5	120	90-120
5	Хромовый ангидрид Щавелевая кислота Кислота борная	30-35 1-3 8-10	40-45	0,3-1,0	40-80	60-80
6	Хромовый ангидрид Лимонная кислота Щавелевокислый калий-титан	6-8 1-2 40-42	40-45	3	120	30-40
7	Кислота ортофосфорная	350-670	15-30	1,0	12	5-10

вые сплавы с различным содержанием меди. В растворе ортофосфорной кислоты оксидируют литейные сплавы алюминия перед нанесением металлических покрытий.

Широко применяют растворы для получения пленок, обладающих электроизоляционными свойствами. Наиболее распространенными среди них являются электролиты на основе борной кислоты, содержащей борной кислоты 90-150 г/л, буры до 2,5 г/л; pH электролита 5,5.

Режим электролиза: напряжение оксидирования 230-250 В; температура электролита 70-95 °С; время оксидирования 25-35 мин; толщина оксидной пленки 0,2-0,3 мкм.

Для формирования антикоррозионных пленок используют хромовокислые и сернокислые растворы при наложении постоянного или переменного тока. Применение переменного тока в сернокислом электролите позволяет существенно увеличить производительность электролитов. Анодирование производится в растворе 12-16%-ной H_2SO_4 при температуре 12-20 °С, плотности тока на аноде $D_a = 3 \div 4{,}5$ А/дм^2, напряжении 18-28 В. Оксидные пленки, полученные при использовании переменного тока на деталях из алюминиевых сплавов и содержащих медь, имеют зеленоватый оттенок из-за осаждения меди.

Для получения покрытий с повышенной износостойкостью применяют способ, разработанный в Харьковском политехническом институте. По этому способу скорость оксидирования выше в 4-10 раз по сравнению со стандартным режимом. Состав электролита – 16%-ный раствор H_2SO_4, температура процесса 12-18 °С, начальная плотность тока 7-10 А/дм^2. Для отвода теплоты электролит интенсивно перемешивается сжатым воздухом. Напряжение на электролите 22-30 В. После задания электрических параметров электролиза процесс протекает без регулирования режима с падающей мощностью. Этим способом получают качественные пленки толщиной до 50 мкм на деформируемых и литейных алюминиевых сплавах.

Анодные оксидные пленки, обладающие повышенной твердостью, формируются в электролитах на основе серной и щавелевой кислот. Для получения твердых пленок большой толщины интенсивно охлаждают электролит и оксидируемые детали.

Ускорение твердого анодирования достигается наложением переменного тока на постоянный.

Успешно используют электролиты, содержащие серную и щавелевую кислоты. Так, в растворе, содержащем 12% H_2SO_4 и 1% $(COOH)_2$, получают на литейных сплавах алюминия, содержащих 3% Cu и 7% Si, твердый оксид при $D_a = 4$ А/дм^2, напряжении 10-60 В, температуре 10 °С со скоростью наращивания 5 мкм/мин.

Благодаря применению переменного тока сохраняется качество предварительной подготовки перед оксидированием. Предварительная подготовка алюминия и его сплавов перед анодированием состоит в обработке резанием, химическом или электрохимическом полировании деталей.

Декоративными и антикоррозионными свойствами обладают пленки, полученные *эматалированием*. Для этого применяют электролиты на основе кислот, растворяющих оксид, с добавками солей титана и циркония, а также полиспиртов в качестве пластификаторов. Эматалевые пленки получают в электролитах, содержащих % (мас. доля): двойной щавелевокислой соли калия и титана 5; ли-

монной кислоты 1,5; ортофосфорной кислоты 0,6; глюкозы 2. Режим: D_a = 5 А/дм^2, напряжение 110 В, температура 25 °С, ток переменный.

Свойства анодных оксидных пленок определяются их пористостью, твердостью, износостойкостью, тепловыми, а также электроизоляционными и коррозионными характеристиками.

Пористость оксидных пленок определяется объемом пустот, имеющихся в пленке, отнесенным к объему всей пленки. Общая пористость включает микропористость, обусловленную механизмом формирования пленки, и макропористость – трещины и механические разрушения. Она зависит от природы сплава, режима электролиза и состава электролита и колеблется для различных сплавов от 10 до 40%. Так, для толстых оксидных пленок, полученных на сплавах алюминия, содержащих медь, в серной кислоте, пористость чистого алюминия составляет 10%, сплава Д16 – 26%, бинарного сплава – 32%. Присутствие в сплаве Si, Mn и Mg незначительно сказывается на пористости, оставляя ее в пределах 10-15%.

Твердость оксидных пленок зависит от концентрации электролита, температуры и плотности тока. С повышением концентрации и температуры электролита она снижается. Использование переменного тока и снижение его плотности уменьшает твердость анодного оксида. Оценка твердости для пленок толщиной более 5 мкм осуществляется методом измерения микротвердости. Для тонких пленок с меньшей точностью применяют метод царапания стеклометром.

Микротвердость анодных оксидных пленок меняется от $1{,}5\times10^4$ МПа на чистом алюминии до $(2{,}5 \div 3{,}0)\ 10^3$ МПа на технических сплавах.

Износостойкость оксидных пленок (способность оказывать сопротивление истиранию) зависит от свойств пленок и условий их изнашивания – трение скольжения или воздействие твердых частиц. Полирование оксидированной поверхности снижает износ и коэффициент трения пленок. Маслоемкость оксида существенно уменьшает износ и в некоторых случаях доводит его до нуля.

Теплоизоляционные свойства оксидированных *алюминиевых сплавов выше* по сравнению с неоксидированным металлом. Так, теплопроводность оксида алюминия равна 0,004-0,012 Дж/(см·с·°С), что в 200-500 раз ниже, чем у чистого алюминия. Коэффициент теплового излучения анодированной поверхности в 10 раз выше по сравнению с чистым металлом. Толстые пленки на алюминиевых сплавах обладают повышенной стойкостью против воздействия высоких температур. Поэтому оксидирование используют при изготовлении изложниц для разливки алюминиевых и магниевых сплавов. При длительном многократном воздействии высоких температур на оксидированной поверхности образуются микротрещины, обусловленные различием в значениях коэффициента линейного расширения анодной пленки ($8 \cdot 10^{-6}$ °С$^{-1}$) и алюминия ($22{,}9 \cdot 10^{-6}$ °С$^{-1}$).

Электроизоляционные свойства оксидных пленок на алюминии обусловлены высоким удельным электрическим сопротивлением оксида алюминия. Эта величина при 20 °С составляет, Ом·см: $5 \cdot 10^{12}$ для стекла; $3 \cdot 10^{14}$ для фарфора; $2 \cdot 10^{15}$ для эбонита; $9 \cdot 10^{15}$ для слюды; $4 \cdot 10^{15}$ для анодной оксидной пленки (толщина 5 мкм) на алюминии. Электрическое сопротивление пленки зависит от состава алюминиевого сплава, режима оксидирования, последующей обработки оксидных пленок, наполнения, условий эксплуатации. Для анодных оксидных пленок характерны высокие адгезия, жаростойкость, теплопроводность, механическая прочность и химическая стойкость.

Коррозионные свойства оксидных пленок определяются их стойкостью к химическому воздействию окружающей среды без нарушения сплошности пленок. Коррозионная стойкость оксидированных алюминиевых изделий резко уменьшается в щелочных средах и средах с присутствием галогенсодержащих ионов. В растворах, содержащих ионы металлов, контактно выделяющихся на алюминии (медь, серебро, ртуть), коррозионная стойкость оксидированных алюминиевых изделий снижается. Увеличение пористости и растрескивание также снижают коррозионную стойкость оксидированных алюминиевых изделий в результате ухудшения изолированности металла от коррозионной среды. С ростом толщины пленок и снижением шероховатости их коррозионная стойкость возрастает, а после достижения определенной толщины пленки – замедляется из-за увеличения пористости.

Технологический процесс анодирования алюминия и его сплавов определяется исходным состоянием поверхности деталей, составом сплава и эксплуатационными свойствами оксидных пленок. Процесс анодирования реализуется по одной из схем, приведенных в табл. 19.

19. Режимы процесса анодирования алюминия и его сплавов

Операция анодирования	Раствор		Режим обработки			
	Компонент	Содержание, г/дм³	Плотность тока, А/дм²	Напряжение, В	Температура, °С	Выдержка, мин
Предварительная обработка резанием (шлифование, полирование, галтовка, крацовка)	Абразив, полировальные пасты	-	-	-	-	-
Очистка от остатков паст	Метилсиликат Алкилсульфат	5-10 1-3	-	-	70-80	5
Промывка	Горячая проточная вода	-	-	-	70-80	1-1,5
	Холодная проточная вода	-	-	-	20	1-1,5
Химическое обезжиривание	Тринатрийфосфат Жидкое стекло ОП-10	80-100 40-60 5-7	-	-	70	3-5
Промывка	Горячая вода Холодная вода	- -	- -	- -	70-80 20	1-1,5 1-1,5
Травление	Едкий натр	40-60	-	-	45-60	2
Электрополирование	Ортофосфорная кислота Серная кислота Хромовый ангидрид	400-800 40-45 2-10	6-15	7-15	70-95	2

Продолжение табл. 19

Операция анодирования	Раствор		Режим обработки			
	Компонент	Содержание, г/дм²	Плотность тока, А/дм²	Напряжение, В	Температура, °С	Выдержка, мин
Осветление *1	Азотная кислота	150 – 300	-	-	20 – 25	2 – 5
Промывка	Горячая проточная вода	-	-	-		1 – 1,5
	Холодная проточная вода	-	-	-	-	1 – 1,5
Анодирование *2	Серная кислота	150 – 200	1 – 1,5	13 – 24	17 – 23	20 – 35
Двукратная промывка	Холодная вода	-	-	-	-	1 – 1,5
Наполнение *3	Натрий бихромат	14 – 16	-	-	90	5 – 8
	Натр едкий	2 – 3				
Промывка	Холодная вода	-	-	-	70 – 80	1 – 1,5
	Горячая вода	-	-	-		1 – 1,5
Сушка	Сжатый воздух	-	-	-		-

*1 При замене травления электрополированием не применяется.
*2 Состав электролита зависит от условий эксплуатации оксидных покрытий.
*3 Состав раствора и режим наполнения определяются свойствами оксидных покрытий.

Типовой технологический процесс анодирования проводят на автоматических линиях с программным управлением. Детали и изделия загружаются на подвески и перемешиваются с помощью операторов или манипуляторов. Для получения толстых оксидных пленок поддерживают низкую температуру электролита и применяют внутреннее охлаждение деталей. Для получения оксидных пленок толщиной 40-60 мкм достаточно интенсивного перемещения, охлаждения или циркуляции электролита.

Сложнопрофилированные детали анодируют с дополнительными катодами, которые располагают так, чтобы не допускать воздушных мешков при загрузке и накоплении газов при анодировании. Мелкие детали (заклепки, винты, гайки, болты, фурнитура) при анодировании насыпают в специальные алюминиевые стаканы (корзины). В корзину с мелкими деталями для улучшения контакта загружают алюминиевую стружку, а для улучшения качества оксидных пленок корзины охлаждают.

Процесс анодирования сопровождается увеличением напряжения тока по мере повышения толщины оксидной пленки. Падение напряжения свидетельствует о плохом контакте детали при подводе тока или "пробое" анодной оксидной пленки. С бракованных деталей снимают оксид в растворе (температура раствора 90 °С), содержащем 35 мл/дм³ H_3SO_4 плотность 1,7 г/см³) и 20 г/дм³ CO_3, после чего подвергают их повторному анодированию. В табл. 20 приведены причины возникновения и способы устранения дефектов при анодировании алюминиевых сплавов.

20. Причины возникновения и способы устранения дефектов при анодировании алюминиевых сплавов

Дефект покрытия	Причины возникновения	Способ устранения
Пятна, затеки на поверхности деталей	Плохое обезжиривание, большое содержание алюминия в электролите	Провести качественное обезжиривание, удалить Al из электролита
Отсутствие пленки на отдельных участках	Плохая подготовка деталей	Обезжирить поверхность
	Загрязнение аксидируемой поверхности маслом, лаком или краской	Соблюдать технологические условия нанесения лака, краски
Растрескивание оксидной пленки	Плохое перемешивание электролита	Применить интенсивное перемешивание и охлаждение электролита
Прожог металла, искрение, темные пятна	Короткое замыкание анодом и катодом	Устранить замыкание
	Локальное повышение тока – "пробой"	Применить движение электролита, снять искрение
Местное растравливание, отсутствие пленки на сложном профиле	Недостаточная промывка деталей после анодирования. Наличие газовых пузырей	Увеличить время промывки в проточной воде. Устранить газовые пузыри

Некоторые методы повышения производительности и улучшения качества гальванических покрытий

Эрлифтный метод нанесения хромовых покрытий с трубчато-эжекторным анодом предлагается по а.с. № 440447 с развитием и внедрениями, выполненными к.т.н. А.Д. Ницевичем. В его основе заложено применение одного из простейших и известных видов насосов для перемещения жидкости. Название "Эрлифт" представляет собой сокращенное наименование воздушного подъемника (насоса) жидкости (от словосочетания "эр" – воздух и "лифт" – подъемник). Схема эрлифтного насоса показана на рис. 30, по которой для его работы необходимо подавать сжатый воздух. Тогда из откачивающей трубки 3 жидкость или электролит через отверстия 4 попадает в подъемную трубку 1. В результате в ванне 5 происходит направленное движение жидкости. На этом принципе работает электролитический анод-эжектор, схема которого приведена на рис. 31. Как видно, деталь 1 помещается в перфорированный анод 3, в котором через отверстия движется электролит, вовлекаемый сжатым воздухом 7.

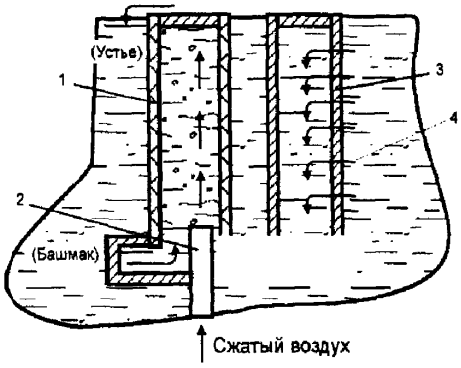
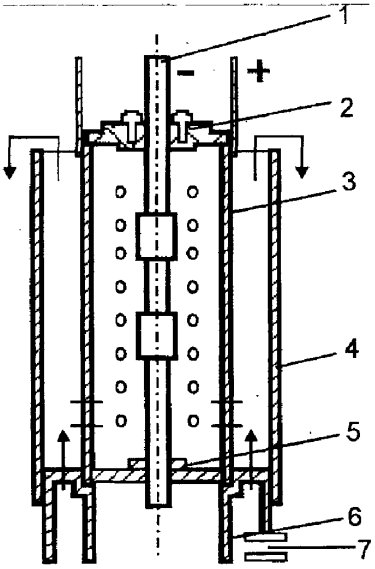


Рис. 30. Схема элементарного эрлифтного насоса:
1 – подъемная трубка; 2 – жиклер; 3 – откачивающая трубка; 4 – боковые откачивающие трубки



При оптимальном режиме осаждения хромовых покрытий с плотностью тока 12 кА/м^2, температуре электролита 60°С, расходе сжатого воздуха 5,5...5,7 м^3/час выход по току составляет 24...26% с обеспечением высокого качества и особенно равномерности и износостойкости нанесенного слоя на длинных валах.

Рис. 31. Электролитический анод-эжектор для хромирования, экранный: 1 – деталь-вал; 2 – верхний центрирующий фланец; 3 – перфорированный анод; 4 – нижний центрирующий фланец; 5 – ресивер-распределитель для сжатого воздуха; 6 – экран; 7 – воздух

Метод повышения качества гальванических покрытий с использованием резонанса переменных составляющих тока *теоретически обоснован* и разработан проф. П.Н. Стойчевым. К схеме питания электролитической ванны добавляется резонансный контур, который настраивается на наибольшую эффективность нанесенных покрытий. Схема такого контура показана на рис. 32. При правильно выбранных условиях нанесения покрытий их качество, и особенно износостойкость, увеличивается на 30...40%. Применение такой схемы и настройка на эффективный режим большой сложности не представляет.

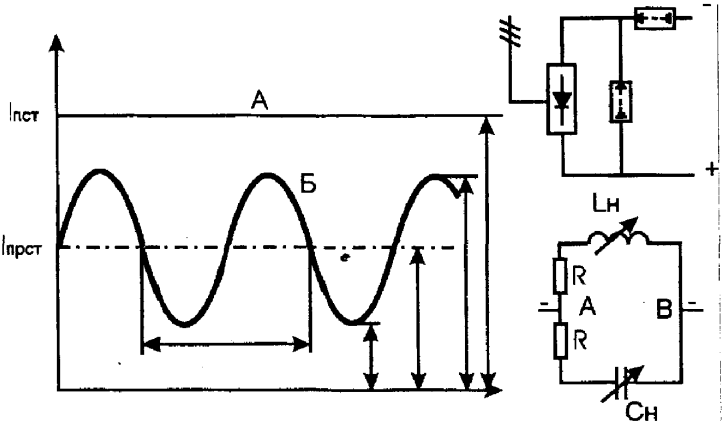


Рис. 32. Резонансная схема и характер следования выпрямленного тока (а) и осциллограмма ПРСТ в резонансном режиме (б)

Глава 6
УПРОЧНЕНИЕ МЕТОДАМИ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ РАСТВОРОВ

Фосфатирование

Фосфатированием называют процесс химического нанесения (осаждения) фосфатной пленки на поверхность сложного фасонного режущего инструмента типа протяжек, разверток, фрез, долбяков, специальных резцов, сверл, зенкеров, метчиков, плашек и деталей, работающих на истирание, для защиты поверхности от коррозии и повышения ее износостойкости.

Оборудованием для фосфатирования служат ванны для обезжиривания (1 шт.), двукратной (каскадной) промывки (2 шт.), промывки (1 шт.), обработки в масле (1 шт.) и сушильный шкаф (1 шт.).

Технологические операции подготовки деталей к фосфатированию приведены в табл. 1, составы растворов и режимы фосфатирования – в табл. 2. Для корректирования фосфатирующего раствора на каждую недостающую "точку" к 100 л раствора добавляют раствор следующего состава, г: $Zn(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ 48; $Zn(NO_4)_2 \cdot H_2O$ 49; H_3PO_4 22, остальное – вода (до объема 108 мл). Для уменьшения испарения фосфатирующего раствора при работе ванны ее поверхность покрывают кусочками полиэтилена, пенопласта или слоем пушечного сала толщиной 3-5 мм.

С целью повышения защитных свойств фосфатной пленки, нанесенной на поверхность инструментов, проводят их специальную обработку, технология которой приведена в табл. 3.

Стальные детали можно обезжиривать в растворе состава, г/л: пирофосфорнокислый натрий 20 ± 5; техническая кальцинированная сода 10 ± 2; кремнекислый натрий 8 ± 1. Режим работы: температура (60 ± 10) °С, время обработки (15 ± 2) мин. Сильно загрязненные детали обезжиривают в растворе состава, г/л: технический едкий натр 80 ± 10; техническая кальцинированная сода 60 ± 10; тринатрий-

1. Операции и режимы подготовки деталей к фосфатированию

Операция	Раствор *		Режим обработки	
	Компонент	Содержание, г/л	Температура, °С	Выдержка, мин
Обезжиривание	Керосин Олеиновая кислота Триэтаноламин Тракрезол	81 6,6 3,4 9,0	18-25 18-25 18-25 9,0	3-4 3-4 3-4 3-4
Двукратная (каскадная) прмывка	Проточная вода	-	80-90	1-2
Промывка	Непроточная дистиллированная вода	-	80-90	15

* Растворитель - вода.

2. Составы растворов для фосфатирования и режимы обработки

Состав, г/л воды			Режим обработки	
$Zn(H_2PO_4)_2$	$Zn(NO_3)_2$	H_3PO_4	Температура, °С	Выдержка, мин
40	55	5	93-98	10-15
40	58	2	94-96	29

Примечание. Кислотность раствора – 60-80 точек. Числом точек называется количество миллиметров 0,1 н. раствора, необходимого для титрования 10 мл фосфатирующего раствора в присутствии фенолфталеина.

3. Операции обработки фосфатной пленки

Операция	Среда	Режим обработки	
		Температура, °С	Выдержка, мин
Двукратная (каскадная) промывка	Проточная вода	80-90	1-1,5
Сушка	Воздух	80-90	3-4
Обработка в масле	Масло И-12	100-115	3-4
Подсушивание для стока излишнего масла	Воздух	20	3-4

фосфат 35 ± 5; натриевое жидкое стекло 15 ± 5; сульфонол НП-3 15 ± 1,5. Режим работы: температура (85 ± 10) С, время обработки (15 ± 2) мин.

При фосфатировании деталей сепараторов и шайб подшипников качения с предварительной подготовкой поверхности выполняют следующие операции:

1) монтаж деталей на подвески;
2) обезжиривание в растворе состава, г/д: технический едкий натр 80 ± 10; техническая кальцинированная сода 60 ± 10; тринатрийфосфат 85 ± 5; жидкое натриевое стекло 15 ± 5; сульфонол НП-3 5 ± 1,5; время обработки (05 ± 2) мин; температура (85 ± 10) °С; заменяют раствор обезжиривания один раз в неделю;
3) промывку в горячей (70-80 °С) и холодной проточной воде.
4) травление раствором, содержащим (160 ± 10) г/л технической серной кислоты и (40 ± 10) г/л хлористого натрия; время обработки (20 ± 5) мин, температура раствора (50 ± 5) °С; замену раствора травления производят один раз в месяц;
5) промывку в холодной проточной воде;
6) химическую активизацию; для получения качественной фосфатной пленки с высокими противокоррозионными свойствами рекомендуется после обезжиривания и травления проводить дополнительную обработку деталей в течение 1-1,5 мин в растворе (20 ± 2) г/л щавелевой кислоты при температуре (20 ± 2) °С; замену раствора производят один раз в месяц; после химической активизации детали без промывки поступают в ванну фосфатирования;
7) фосфатирование раствором 1 или 2.

Состав раствора 1, г/л: фосфорнокислый однозамещенный цинк 50 ± 5; азотнокислый цинк 50 ± 5; ортофосфорная техническая кислота 14 + 3; щавеле-

вокислый двухводный цинк 0,1-0,2. Режим работы на этом растворе: температура (60 ± 5) С, время обработки (20 ± 5) мин, общая кислотность 90-100 точек, свободная кислотность 10-15 точек. Коррозионная стойкость фосфатной пленки 7-8 мин.

Состав раствора 2, г/л: препарат "Мажеф" 60 ± 5; азотнокислый цинк 90 ± 10; фтористый технический натрий 3 ± 1. Режим работы на этом растворе: температура (40 ± 5) °С, время обработки (30 ± 5) мин, общая кислотность 80-85 точек, свободная кислотность 4-6 точек. Коррозионная стойкость фосфатной пленки 9-10 мин.

Фосфатные пленки, полученные при обработке деталей растворами 1 и 2, имеют мелкокристаллическую структуру, их пористость минимальна, пленки обладают высокой коррозионной стойкостью и прочностью сцепления с основным металлом. В процессе эксплуатации фосфатирующий раствор необходимо ежедневно проверять на общую и свободную кислотность и при необходимости корректировать.

Низкотемпературное фосфатирование крепежных деталей. Перед фосфатированием детали подвергают электрохимическому обезжириванию, промывке в горячей и холодной воде и декапированию в растворе соляной кислоты (1 : 1). Состав раствора фосфатирования, г/л: соль "Мажеф" 35-60; азотно кислый цинк 60-80; фтористый натрий 3-4. Температура раствора 50-60 °С; время обработки деталей 20 мин.

После фосфатирования на поверхности деталей образуется мелкокристаллическая фосфатная пленка светло-серого или серого цвета с хорошей коррозионной стойкостью.

Для приготовления раствора расчетное количество соли "Мажеф" засыпают в отдельную емкость, заливают горячей водой (температура воды 80-90 °С) и выдерживают в течение 2-3 ч. Затем раствор сливают в рабочую ванну. В отдельных емкостях растворяют расчетное количество азотнокислого цинка и фтористого натрия. Полученные растворы также сливают в рабочую ванну.

В приготовленном для фосфатирования прозрачном растворе обрабатывают случайные детали до получения раствора мутного цвета. Общая кислотность проработанного раствора должна составлять 70-100 точек, а свободная – 5-10 точек.

Корректирование раствора для фосфатирования проводят по кислотности из расчета на одну точку (1 г/л соли "Мажеф" и 3 г/л азотнокислого цинка). Фтористый натрий добавляют 2 раза в неделю из расчета 3 г/л раствора.

Химическое фосфатирование с последующей пропиткой дисульфидмолибденовой смазкой ВНИИНП-229 выполняют в растворе состава, г/л: монофосфат цинка 35; азотнокислый цинк 35; ортофосфорная кислота 15. Температура раствора 95-98 °С, время выдержки 5 мин. Перед фосфатированием поверхность обезжиривают. Затем на нагретый до 100 °С фосфатированный инструмент наносят дисульфидмолибденовую смазку ВНИИНП-229 и выдерживают его в электрошкафу 2-3 ч при температуре 150-200 °С.

Технологический процесс одновременного обезжиривания, травления и фосфатирования. В раствор на основе препарата "Мажеф" вводят азотнокислый цинк в качестве ускорителя, борную кислоту для обеспечения стабильности раствора и увеличения прочности пленки, оксалат цинка (щавелевокислый цинк) для уменьшения шламообразования и нитрат кальция для придания пленке мелкокристалличности и повышения эластичности покрытия.

Состав раствора, г/л: препарат "Мажеф" 100 ± 10; азотнокислый цинк 240 ± 25; фосфорнокислый однозамещенный аммоний 60 ± 5; борная кислота 30 ± 2; сульфонол НП-3 2,5 ± 0,5; азотнокислый кальций 3,5 ± 0,5; щавелевокислый аммоний 0,15 ± 0,02; стальная стружка (стали 30, 40, 50) 5 ± 1. Режим работы: температура (50 ± 2) °С; время выдержки (20 ± 5) мин; общая кислотность точек 190-210; свободная кислотность точек 12-18; отношение общей кислотности к свободной 11-15. Коррозионная стойкость фосфатной пленки 10-12 мин.

Раствор для одновременного обезжиривания, травления и фосфатирования приготовляют в деминерализованной конденсационной или умягченной воде (последнюю готовят добавлением 2-2,5 г/л углекислой соды в водопроводную воду, кипячением в течение 1 -1,5 ч, отстаиванием и удалением осадка).

Способ приготовления воды оказывает существенное влияние на шламообразование, долговечность раствора и коррозионную стойкость покрытия. Основную емкость заполняют на 1/2 объема водой, растворяют рассчитанное количество фосфорнокислого однозамещенного аммония, сульфонала НП-3 и стальной стружки. Затем раствор подогревают до 60 °С и выдерживают в течение 3 ч. В отдельной емкости азотнокислый цинк смешивают с препаратом "Мажеф", смачивают водой, перемешивают и оставляют на 3-4 ч. После этого смесь азотнокислого цинка с препаратом "Мажеф" помещают в основную емкость, добавляют рассчитанное количество борной кислоты, азотнокислого кальция и щавелевокислого аммония. Раствор дополняют до рабочего объема, нагревают до 50 °С в течение 1 ч. После прогрева раствора определяют общую и свободную кислотности, которые должны составлять соответственно 190-210, 12-18.

Для повышения общей кислотности 1 л раствора на одну точку в раствор необходимо ввести выдержанную не менее 1 ч сухую смесь 1,5 г препарата "Мажеф" и 3 г азотнокислого цинка. Для понижения свободной кислотности на одну точку в 1 л фосфатирующего раствора вводят 1 мл 0,1 н. раствора едкого натра.

Технологический процесс фосфатирования состоит в следующем. Детали монтируют на подвески или загружают в барабан. Затем их обрабатывают в кипящей воде в течение 4-5 мин (при незначительном загрязнении). Далее следуют операции: предварительная очистка в растворе с тринатрий-фосфатом и мыльным спиртом; фосфатирование в растворе одновременного обезжиривания, травления и фосфатирования при 50-55 °С с выдержкой 20 мин; промывка фосфатированных деталей в теплой проточной воде при 50-60 °С, затем в горячей проточной воде при 70-80 °С с трех-четырехкратным погружением; сушка горячим сжатым воздухом при температуре 70-80 °С с продолжительностью выдержки 8-10 мин; осуществляется пропитка маслом. Для пропитки деталей с целью увеличения их антикоррозионных свойств используют УКРИНОЛ-11 с концентрацией 40-100 г/л раствора при температуре 65-75 °С, время обработки (3±1) мин.

При наличии на деталях сильных загрязнений (жирная металлическая пыль, окалина, коррозия и т. п.) проводят их предварительную очистку в растворе тринатрийфосфата [(50 ± 5) г/л] и мыльного спирта [(4 ± 1) мл/л] при температуре (50 ± 5) °С; время обработки (8 ± 2) мин.

Такая технология позволяет сократить продолжительность обработки стальных деталей в 2,5-3 раза, уменьшить число операций; при этом сокращается расход воды, электроэнергии и материалов примерно в 2,5 раза. Последующим фосфатированием можно увеличить износостойкость азотированных поверхностей

[а. с. 926070 (СССР)]. В этом случае фосфатирование проводят в растворе препарата "Мажеф" с концентрацией 30-40 г/л при 90-100 °С в течение 20-30 мин (для получения развитой поверхности, хорошо удерживающей смазочный материал), после чего необходима изотермическая выдержка в течение 10-40 мин при температуре 100-150 °С в индустриальном масле, содержащем 5-10% дисульфида молибдена.

Температура изотермической выдержки зависит от марки масла. Чем выше температура вспышки масла, тем выше температура выдержки.

Пример. Концевые фрезы диаметром 6 мм из быстрорежущей стали Р6М5 азотируют по двухстадийному режиму: нагрев до температуры 530 °С и первые 20 мин выдержки проводят к атмосфере чистого аммиака; на второй стадии азотный потенциал снижают, разбавляя аммиак азотно-водородной смесью в соотношении 50% NH_3 и 50% (N_2 + H_2), и в этой среде продолжают процесс азотирования еще в течение 40 мин. В результате на инструменте получают азотированный слой, состоящий из α-твердого раствора азота в сплаве и поверхностной ε-фазы с содержанием 7% азота. Затем фрезы подвергают фосфатированию в растворе препарата "Мажеф" с концентрацией 40 г/л при (95 ± 5) °С в течение 30 мин, после чего проводят изотермическую выдержку в индустриальном масле с добавлением 5-10% дисульфида молибдена 20 мин при температуре 100 °С и выдержке 10-40 мин. После такой обработки стойкость фосфатированного инструмента на 15-20% выше стойкости инструмента, упрочненного только диффузионным азотированием. Шероховатость обрабатываемой поверхности снижается. Отпадает необходимость в консервации готового инструмента.

Ванну для фосфатирования изготовляют из стали и оборудуют теплоизоляционным покрытием, нагревателем и вытяжной вентиляцией. Во избежание взмучивания осадка фосфатов на расстоянии 100-150 мм от дна ванны устанавливают перфорированную перегородку. Перед началом эксплуатации новой ванны необходимо покрыть ее внутреннюю поверхность фосфатным слоем и лишь после этого начинать фосфатирование. Сушку технологической оснастки после фосфатирования проводят в сушильном шкафу, оборудованном вытяжной вентиляцией.

При обезжиривании, промывке и фосфатировании технологической оснастки применяют корзины из тонкой проволоки или перфорированной листовой стали и подвески различных конструкций.

Качество фосфатной пленки определяется плотностью, зернистостью, шероховатостью, защитными свойствами и коррозионной стойкостью. Покрытие должно быть плотным, гладким, мелкозернистым; цвет пленки может быть от светло-серого до черного. Не допускается наличие коррозии и налета взмученного осадка, а также черного налета, оставляющего следы на руках или хлопчатобумажной салфетке. Допускается наличие пятен и непокрытых точек в местах контактов с подвесным устройством на нерабочей поверхности технологической оснастки. Внешнему осмотру после фосфатирования подвергают всю партию деталей. Детали с неудовлетворительным качеством пленки выбраковывают. Наличие фосфатной пленки проверяют визуально, царапая поверхность покрытия, протирая ее мелкозернистой абразивной шкуркой или соскабливая.

Для определения защитных свойств фосфатной пленки пользуются *капельным методом*. Метод заключается в том, что на заданный участок поверхности при температуре 15-25 °С наносят одну каплю контрольного раствора. Время

(мин) от момента нанесения капли и до изменения ее цвета (капля становится темно-коричневой, почти черной) служит характеристикой стойкости пленки.

Время до изменения цвета капли, мин	1	1-2	2-5	5
Оценка защитных свойств	Низкая	Пониженная	Средняя	Высокая

При капельном методе испытания контроль проводят на двух-трех образцах-свидетелях, взятых из партии. Состав контрольного раствора, мл: 0,4 М раствор $CUSO_4$ 40; 10%-ный раствор NaCl 20; 0,1 М раствор HCl 0,8.

Для контроля коррозионной стойкости фосфатной пленки фосфатированную деталь подвешивают на шелковых или капроновых нитях в 3%-ном растворе NaCl (температура раствора 20 °С) на 5-15 мин, после чего промывают водой и оставляют на воздухе в течение 25-30 мин. Если в результате испытания пленка не изменилась, то ее качество считается удовлетворительным. Контроль проводят на двух-трех образцах-свидетелях, взятых из партии. Образцы-свидетели должны быть термически обработаны и изготовлены из стали той же марки, что и фосфатируемая технологическая оснастка или деталь.

Никелирование

Проведение процесса никелирования. В отличие от гальванического никелирования, отличающегося неравномерностью отложения никеля на деталях со сложной конфигурацией поверхности, *химическое осаждение никеля* протекает равномерно по всей поверхности независимо от сложности профиля изделия. Никелевое покрытие, полученное химическим осаждением, имеет следующие преимущества: поверхность блестящая, толщина слоя равномерная, пористость незначительная (при толщине более 20 мкм покрытие практически беспористое), высокая прочность сцепления с основным металлом, достаточно высокие коррозионная стойкость и износостойкость, большая твердость без термической обработки.

Для химического никелирования применяют кислые и щелочные растворы. В кислых растворах pH поддерживается в пределах от 3,5 до 5,0, а в щелочных – от 8 до 10.

Каждый тип раствора имеет свои преимущества и недостатки. В кислых растворах можно работать без замены до тех пор, пока содержание в них фосфитов не превысит 60 г/л. В щелочных растворах можно работать более длительное время, пока содержание фосфитов не будет более 350-400 г/л, что достигается применением в составе щелочного раствора веществ с высокими комплексообразующими свойствами (например, лимоннокислого натрия), повышающих растворимость фосфитов. Наличие в составе раствора аммиака (легколетучего вещества) приводит к частому корректированию раствора, что можно отнести к недостаткам щелочных растворов.

Осадки, полученные в кислых растворах, имеют мелкокристаллическую структуру и меньшую пористость, чем осадки, полученные в щелочных растворах. В щелочных растворах достигаются большие скорости осаждения.

Кислые растворы (pH = 4,0 ÷ 6,5) применяют главным образом при нанесении покрытий на детали из черных и некоторых цветных металлов (медь, латунь и др.), особенно когда их рабочие поверхности должны иметь высокие твер-

дость, износостойкость и коррозионно-защитные свойства. Основные показатели эффективности растворов: скорость образования покрытий при той или иной плотности загрузки; масса покрытия, полученного из 1 л раствора (т. с. выход металла), стабильность, зависимость этих величин от различных факторов (кислотности, температуры и т. д.).

Существует много рецептур для химического никелирования как в кислых, так и в щелочных растворах. Распространенный кислый раствор одноразового действия для никелирования черных и цветных металлов содержит, г/л; сернокислого никеля $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ 20; уксуснокислого натрия $CH_3COONa \cdot 3H_2O$ 10; фосфорноватистокислого натрия (гипофосфита натрия) $NaH_2PO_2 \cdot H_2O$ 10; pH раствора 4,5-5,0; температура (92 ± 2) °С; плотность загрузки 1-2 дм^2/л.

Кислый раствор содержит, г/л; уксуснокислого никеля $(CH_3COO)_2Ni$ 15; гипофосфита кальция $Ca(H_2PO_2)_2$ 13; pH раствора 4,1-4,3; температура 96-98 °С. Такой раствор применяют для никелирования стали, алюминия, меди и других металлов. Его состав дополнен стабилизирующей добавкой тиомочевины в количестве 0,002-0,003 г/л, а гипофосфит кальция часто заменяют гипофосфитом натрия. При одноразовом использовании никель может быть выработан полностью, раствор становится бесцветным. Возможно его корректирование добавлением соли никеля и гипофосфита.

Стоимость сернокислого никеля примерно в 4 раза ниже стоимости уксуснокислого никеля.

Для никелирования используют также кислый раствор, содержащий, г/л: хлористого никеля $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ 30; лимоннокислого натрия $Na_3C_6H_5O_7 \cdot nH_2O$ 10; гипофосфита натрия $NaH_2PO_2 \cdot H_2O$ 10; дисульфда молибдена MoS_2 3. В табл. 4 приведены составы кислых растворов.

4. Составы и параметры кислых растворов химического никелирования

Компонент	Содержание компонента (г/л) при номере состава								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Хлористый никель	30	30	30	21	-	-	-	20	-
Сернокислый никель	-	-	-	-	21	-	15	-	17
Уксуснокислый никель	-	-	-	-	-	15	-	-	-
Гипофосфит натрия	10	10	10	24	24	-	10	20	-
Гипофосфит кальция	-	-	-	-	-	13	-	-	16
Уксуснокислый натрий	-	-	-	10	10	-	10	8	8
Уксусная кислота, мл/л	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Гликолевокислый натрий	10	-	-	-	-	-	-	-	-
Лимоннокислый натрий	-	10	-	-	-	-	-	-	-
Малеиновый ангидрид	-	-	-	-	1,5	-	-	-	-
Янтарнокислый натрий	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Янтарная кислота	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Молочная кислота	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Сульфид свинца, мг/л	15-25	10-20	10-20	15-25	-	10-15	10-15	10-15	10-15

Параметр раствора	Номер состава								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH		4-6		4,8-5,0	4,5-5,0	4,0-4,5	4,9-5,2	5,3-5,5	
t, °С	-	-	90-92		92-94	85-90	70-95	90-92	
Скорость осаждения покрытия, мкм/ч	13	5	15	23	18-20	12-15	8-11	10-12	10-12

Продолжение табл. 4

Компонент	Содержание компонента (г/л) при номере состава						
	10	11	12	13	14	15	16
Хлористый никель	30	-	6	-	17	20	16
Сернокислый никель	-	30	-	20	-	-	-
Уксуснокислый никель	-	-	-	-	-	-	-
Гипофосфит натрия	15	10	7	10	-	27	24
Гипофосфит кальция	-	-	-	-	10	-	-
Уксуснокислый натрий	-	10	10	8	8	-	-
Уксусная кислота, мл/л	15	-	-	-	-	-	-
Гликолевокислый натрий	-	-	-	-	-	-	-
Лимоннокислый натрий	-	-	-	-	-	-	-
Малеиновый ангидрид	-	-	-	-	-	-	-
Янтарнокислый натрий	-	-	-	-	-	16	16
Янтарная кислота	-	-	6	-	-	-	-
Молочная кислота	-	-	-	-	-	-	18
Сульфид свинца, мг/л	10-15	10-15	10-12	-	-	-	8-10

Параметр раствора	Номер состава						
	10	11	12	13	14	15	16
pH	4,5-5,0		4,0-4,5	4,5-5,0	4,5-5,0	4,5-5,5	5,5-60
t, °C	85-87	90-92	75-80	85-90	85-88	90-99	
Скорость осаждения покрытия, мкм/ч	12-15	12-14	12-15	8-10		35	47,5

Максимальная скорость осаждения никеля наблюдается в некорректируемых кислых растворах лишь в первый час работы. С течением времени скорость никелирования в некорректируемых кислых растворах постепенно уменьшается и через 6 ч работы процесс образования покрытий практически прекращается, возрастает кислотность растворов. Они мутнеют, на дно ванны выпадает нерастворимый осадок. Перегрев растворов и изменение оптимальной концентрации компонентов приводят к саморазряду и образованию никеля в объеме ванны. За одинаковый промежуток времени толщина покрытий из этих растворов получается различной.

С целью повышения стабильности кислых растворов, их многоразового использования в растворы вводят сернистые вещества (тиомочевину, гипосульфид и др.), а также соединения некоторых металлов (сульфид свинца, хромовокислый свинец и др.), малое количество которых предотвращает саморазряд даже при высоких температурах. Составы кислых растворов со стабилизирующими добавками, дающими возможность многоразового использования раствора, приведены в табл. 5.

Раствор состава № 1 используют для работы в стационарных ваннах; составов № 2 и 3 – в установках для нанесения покрытия в проточных растворах, но могут быть использованы и для работы в стационарных ваннах.

Корректирование раствора № 3 при работе в стационарной ванне производится добавлением через 1 ч работы концентрированных растворов соли никеля и гипофосфита и через 3-4 ч работы – уксуснокислого натрия; pH поддерживается добавлением 5%-ного раствора едкого натра.

5. Составы и параметры кислых растворов со стабилизирующими добавками для химического никелирования

Компонент	Содержание компонента (г/л) при номере состава		
	1	2	3
Сернокислый никель $NiSO_4 \cdot 7H_2O$	20	20-30	21
Уксуснокислый натрий $CH_3COONa \cdot 3H_2O$	10	-15	10
Гипофосфит натрия $NaH_2PO_2 \cdot H_2O$	10(25)	8-20	24
Уксусная кислота CH_3COOH 98%-ный, мл/л	6,2-6,5	1-3	-
Тиомочевина NH_2CSNH_2	0,002-0,003	-	-
Гипосульфит натрия $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$	-	0,005-0,015	-
Хромовокислый свинец $PbCrO_4$	-	До насыщения	-
Малеиновый ангидрид $C_4H_2O_3$	-	-	1,5-2,0
Параметр раствора	**Номер состава**		
	1	2	3
Температура раствора, °С	92±2	80-99	94
pH	4,1-4,3	4,2-5,4	-
Скорость осаждения, мкм/ч	10-12	15-20	-
Плотность нагрузки, дм²/л	1	-	-

Для никелирования деталей из черных и цветных металлов предпочтителен кислый раствор состава № 1, в котором используются наиболее дешевые никелевая соль (сернокислый никель) и комплексообразователь (уксуснокислый натрий). Стабилизирующая добавка (тиомочевина) дает возможность использовать раствор несколько раз и работать при достаточно высокой температуре 90-94 °С.

Для повышения стабильности этих растворов даже при 96-98 °С целесообразно добавлять в них сульфид свинца (15-25 мг/л).

Процесс восстановления никеля в щелочных растворах протекает по тем же законам, что и в кислых. Процесс сопровождается выделением водорода и окислением гипофосфита до фосфита. Скорость осаждения покрытия повышается при увеличении содержания никеля и гипофосфита в растворе. Скорость осаждения покрытия снижается с увеличением содержания комплексообразователя в растворе.

Щелочные растворы применяют главным образом при нанесении покрытий на коррозионно-стойкую сталь, алюминий, титан, магний, различные неметаллы, а также при необходимости осаждения многокомпонентных покрытий (сплавов) на основе никеля или кобальта (например, никель-кобальт-фосфорных или кобальт-вольфрам-фосфорных и других покрытий).

Благодаря наличию в составе щелочных растворов таких комплексообразователей, как лимоннокислый натрий и аммиак, они могут при корректировании работать длительное время. Однако в результате регулярного добавления гипофосфита в ванне растет концентрация фосфитов; добавка хлористого никеля и аммиака увеличивает концентрацию хлористого аммония, что нежелательно.

Составы щелочных растворов для химического никелирования приведены в табл. 6. Из щелочных растворов наибольшее применение находят растворы с лимоннокислым натрием, предпочтителен состав № 1.

Универсальный раствор, который может быть по необходимости кислым или щелочным, содержит, г/л: хлористого никеля $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ 30; хлористого

6. Составы щелочных растворов для химического никелирования

Компонент	Содержание компонента (г/л) при номере раствора	
	1	2
Хлористый никель $NiCl_2 \cdot 6H_2O$	45	25
или сернокислый никель $NiSO_4 \cdot 7H_2O$		
Хлористый аммоний NH_4Cl		
Лимоннокислый натрий $Na_3C_6H_5O_7 \cdot nH_2O$	45	50
Гипофосфит натрия $Na_2HPO_2 \cdot H_2O$	20	30
Параметр раствора	**Номер раствора**	
	1	2
Аммиак NH_4OH 25%-ный до pH	8 - 9	
Температура раствора, °С	75-92	80-88
Скорость осаждения покрытия, мкм/ч	8-10	18-20
Плотность загрузки, $дм^2/л$	2	1

аммония NH_4C 30; янтарнокислого натрия $C_4H_4O_4Na_2$ 100; гипофосфит натрия $NaH_2PO \cdot H_2O$ 25; pH кислого раствора 4,5-6,5; pH щелочного раствора 7-9; температура раствора 70-90 °С. Состав рекомендуется для никелирования деталей из стали, латуни, алюминия и ферритов.

Для замены дорогостоящих солей органических кислот, применяемых в качестве комплексообразователей на более дешевые соли минеральных кислот, используют щелочные растворы, составы которых приведены в табл. 7.

Раствор состава № 1 применяют для никелирования стальных деталей, работающих на трение, и пресс-форм сложной конфигурации (вместо хромирования). В составе раствора лимоннокислый натрий частично заменен уксуснокислым аммонием.

В процессе работы раствор подщелачивается газообразным аммиаком и корректируется концентрированными растворами соли никеля (150-200 г/л) и гипофосфита (300-400 г/л). Корректирование осуществляют с учетом следующих данных: при никелировании 1 $дм^2$ поверхности и толщине покрытия 10 мкм расходуется 0,89 г металлического никеля и соответственно на 1 г никеля – 5 г гипофосфита.

Раствор используют многократно до тех пор, пока содержание в нем фосфитов не превысит 350-400 г/л. Раствор периодически фильтруют через бязевый фильтр.

Для уточнения расчетных данных раствор периодически подвергают химическому анализу. Процесс осуществляется в чугунном котле, стенки которого покрыты кобальтовой эмалью. Для обогрева используют водяную рубашку. В составе раствора применяют технические соли: сернокислый никель и хлористый аммоний.

Для повышения прочности сцепления покрытия с основой перед химическим никелированием проводят гидропескоструйную обработку. Остальные операции подготовки поверхности осуществляют обычными способами. Твердость получаемого никель-фосфорного покрытия $6,4 \cdot 10^3$ МПа, после термической обработки при температуре 300-400 °С в течение 1 ч она увеличивается до $9,4 \cdot 10^3$ МПа.

7. Составы и параметры щелочных растворов для химического никелирования с частичной и полной заменой солей органических кислот

Наименование составляющих и режим процесса	Содержание компонента (г/л) при номере состава				
	1	2	3	4	5
Никель сернокислый $NiSO_4 \cdot 7H_2O$	45-50	30	-	-	-
Хлористый никель $NiCl_2 \cdot 6H_2O$	-	-	-	25	20
Гипофосфит никеля $Ni(H_2PO_2)_2$	-	-	7-15	-	-
Лимоннокислый натрий $Na_3C_6H_5O_7 \cdot nH_2O$	25-35	-	-	-	-
Уксуснокислый аммоний CH_3COONH_4	25-35	-	-	-	-
Сернокислый аммоний $(NH_4)_2SO_4$	-	30	30	-	-
Хлористый аммоний NH_4Cl	50-60	-	-	40-45	-
Щавелевокислый аммоний $(NH_2)C_2O_4 \cdot H_2O$	-	-	-	-	60
Уксуснокислый натрий $CH_3COONa \cdot 3H_2O$	-	-	-	-	40
Гипофосфит натрия $NaH_2PO_2 \cdot H_2O$	10-12	10	10	25	25
Пирофосфат натрия $Na_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$ или пирофосфат калия $K_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$	-	-	-	60-70	-

Пример процесса	Номер состава				
	1	2	3	4	5
pH	8-10	8,2-8,5	8,2-8,5	10,0-10,5	8,2
Температура раствора, °С	78-85	85±2	80-90	70-75	85-87
Скорость осаждения, мкм/ч	10-12	15-18	15-20	20-25	11
Плотность загрузки, $дм^2/л$	0,8-1,0	1,0	1,0	-	-

Растворы составов № 2 и 3 предназначены для никелирования черных и цветных металлов. В растворе состава № 2 в качестве комплексообразователя используют сернокислый аммоний; в растворе состава № 3 в качестве никелевой соли – гипофосфит никеля, в качестве второй составляющей раствора (взамен сернокислого аммония) можно использовать уксуснокислый натрий в количестве 10 г/л. Можно работать, применяя один гипофосфит никеля, который получают из сернокислого никеля и гипофосфита кальция следующим образом: необходимое количество гипофосфита кальция растворяют в воде, в другой порции воды растворяют сернокислый никель; затем второй раствор вливают при перемешивании в первый, дают отстояться в течение 1-2 сут., фильтруют для удаления сернокислого кальция и доливают до определенного объема.

В растворах составов № 2 и 3 не применяют дорогостоящие органические добавки, что повышает рентабельность процесса никелирования.

Раствор может быть использован в течение 18-24 ч при условии корректирования через каждые 2 ч добавлением 10 г/л хлористого никеля, 15 г/л гипофосфита (в виде растворов) и 25%-ного аммиака до pH = 10,0 ÷ 10,5. В растворе можно наращивать покрытия большой толщины (порядка 70 мкм) в течение 3-3,5 ч. Полученные осадки содержат 7-8% фосфора, имеют твердость $(6\pm7) \cdot 10^3$ МПа, после термической обработки твердость повышается до $(0,9\pm1,0) \cdot 10^4$ МПа.

Приготовление растворов для химического никелирования как кислых, так и щелочных не вызывает трудностей.

В подогретой до 50-60 °С воде растворяют соль никеля, буферирующие и комплексообразующие добавки и фильтруют. Затем добавляют в кислые растворы

уксусную или соляную кислоту до необходимого значения pH, а в щелочной раствор – аммиак до устойчивой синей окраски раствора, что соответствует pH = 8÷9. Гипофосфит вводят в раствор непосредственно перед никелированием. В случае применения растворов со стабилизирующими добавками их вводят в раствор также перед началом процесса.

Допускается применение водопроводной воды для приготовления растворов. Вода с повышенной жесткостью отрицательно влияет на процесс химического никелирования и для приготовления растворов непригодна.

Осадок химического никеля на упрочняемую поверхность инструментов и иной технологической оснастки чаще всего получают из раствора, содержащего, г/л; сернокислого никеля 30; уксуснокислого натрия 10; гипофосфита натрия 10; тиосульфата натрия 0,007; уксусной кислоты 2 мл/л; хромовокислого свинца до насыщения. Кислотность раствора pH = 4,2÷4,8; температура 90-92 °С; плотность загрузки 1 дм^2/л. Толщина слоя осадка 6-9 мкм за 30-40 мин; толщина покрытия 15-18 мкм. После никелирования инструмент или детали подвергают термообработке в течение 1 ч при температуре 350-400 °С.

Слой твердого никеля можно осадить химическим способом из состава, г/л: кристаллический сернокислый никель 80; фосфорноватистокислый натрий 24; уксуснокислый натрий 12; борная кислота 8; хлористый натрий 6. Пористость в слое получают травлением в течение 20-60 с в ванне, содержащей фтористый аммоний и плавиковую кислоту. Способ позволяет повысить стойкость пресс-форм для литья под давлением, штампов, лезвийных инструментов (сверл, метчиков, разверток и др.).

Если в никельсодержащий раствор ввести мелкодисперсные твердые вещества типа алмаза, карбидов или нитридов бора, вольфрама, кобальта, хрома, ванадия и др., то при восстановлении никеля из суспензии образуется комплексный осадок с высокой износостойкостью.

Например, покрытие алмазным порошком, закрепляемым химически осаждаемым слоем никеля, применяют для упрочнения колец уплотнения газовых турбин и насосов с высокой подачей, нагревательных барабанов, фрикционных дисков, нитеводителей, пресс-форм для изготовления бакелитовых деталей, шнеков для термопласт-автоматов, а также рабочих поверхностей калибров, микрометрических и других измерительных приборов.

Метод химического нанесения никеля с твердыми наполнителями позволяет точно контролировать его толщину. Применяемые в этом случае никель-фосфорные сплавы могут быть после нанесения подвергнуты термической обработке (например, 24 ч при температуре 270 °С или 1 ч при температуре 400 °С), что обеспечивает повышение твердости до 1000 HV. Рекомендуемые параметры осажденного алмазного защитного слоя: объемное содержание алмазов 20-25% (допустимо до 40%); толщина слоя покрытия 25-50 мкм; твердость никелевой основы 1000-1200 HV; коэффициент трения 0,08-0,2 на синтетическом волокне.

Износостойкость металлических пресс-форм, предназначенных для изготовления изделий из пластмассы, бакелита, фосфора и электрофосфора, повышают химическим нанесением многослойного композиционного покрытия, в котором первый слой представляет собой химическое никелевое покрытие, а последующие состоят из никеля, содержащего оксиды, карбиды, металлы, алмазный порошок, бориды, нитриды и другие материалы. Для улучшения условий приработки инструмента в наружных слоях покрытия осаждают более мягкие компо-

ненты, например электрокорунд, а во внутренних – более твердые, например карбид бора. После нанесения всех слоев покрытие подвергается термической обработке при температуре 200-750 °С в течение 0,25-48 ч. Износостойкость многослойных покрытий выше, чем однослойных. Изношенное покрытие может быть удалено химическим способом и после предварительной подготовки поверхности восстановлено.

Химическое никелирование стали, ковара, инвара, супериивара может осуществляться как в кислых, так и щелочных растворах. Подготовку поверхности для химического никелирования выполняют теми же способами, что и при гальваническом нанесении покрытия.

Из кислых растворов рекомендуется раствор состава, г/л: сернокислого никеля $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ 20; уксуснокислого натрия $CH_3COONa \cdot 3H_2O$ 10; фосфорноватистокислого натрия (гипофосфита натрия) $NaH_2PO_2 \cdot H_2O$ 25; 98%-ной уксусной кислоты CH_3COOH 6,2-6,5 мл/л; тиомочевины NH_2CSNH_2 0,003. Температура раствора 90-94 °С. pH = 4,1÷4,3, плотность загрузки 1 дм^2/л, скорость осаждения покрытия 10-12 мкм/ч.

Тиомочевину применяют в качестве стабилизирующей добавки, предохраняющей раствор от самопроизвольного разложения в процессе работы.

Гипофосфит, введенный в раствор в количестве 25 г/л, обеспечивает непрерывную работу (при указанной плотности загрузки) в течение 2,5-3,0 ч и дает возможность наносить покрытие 36-42 мкм. При уменьшении плотности загрузки до 1 дм^2/л в растворе можно получить покрытие большей толщины. По истечении 2,5-3 ч раствор рекомендуется корректировать, добавляя в него соль никеля, гипофосфит и тиомочевину до первоначального состава. Уксуснокислый натрий при корректировании не добавляют.

При низких значениях pH = 4,1÷4,3 не происходит выпадания фосфитов, ухудшающих качество покрытия. В процессе работы необходимо поддерживать постоянное значение pH раствора, добавляя в него 10 мл/л 2,5%-ного раствора щелочи через каждые 30 мин работы, что обеспечивает сохранение постоянной скорости осаждения покрытия. Раствор указанного состава имеет ряд преимуществ перед другими кислыми растворами: не содержит дефицитных и других материалов, стабилен в работе и дает возможность многоразового использования.

Щелочный раствор для никелирования этих металлов содержит, г/л: никеля сернокислого $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ или хлористого $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ 45; хлористого аммония NH_4Cl 50; лимоннокислого натрия $Na_3C_6H_5O_7 \cdot nH_2O$ 45; фосфорнолимоннокислого натрия (гипофосфит натрия) $NaH_2PO_2 \cdot H_2O$ 20; 25%-ного аммиака NH_4OH до pH = 8÷9. Температура раствора 75-92 °С, плотность загрузки раствора 2 дм^2/л, скорость осаждения покрытия 8-10 мкм/ч.

После нанесения покрытия детали подвергают термической обработке при 200-220 °С в течение 1-2 ч с целью снятия внутренних напряжений. Для повышения твердости детали нагревают до температуры 400 °С в течение 1 ч.

Снятие недоброкачественного никелевого покрытия проводят в растворе, содержащем: серной кислоты H_2SO_4 (плотность 1,84 г/см^3) 1 объем. доля; азотной кислоты HNO_3 (плотность 1,4 г/см^3) 2 объем. доли; сернокислое (оксидное) железо $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$ 5-10 г/л. Температура раствора 20 °С, плотность загрузки 1 дм^2/л.

Для снятия некачественного покрытия можно применять раствор, состоящий из 7 объем. частей азотной кислоты (плотность 1,4 г/см^3) и 3 объем. частей 98%-ной уксусной кислоты.

Химическое никелирование меди и ее сплавов. Медь не является каталитическим металлом для реакции восстановления никеля гипофосфитом. Поэтому для начала процесса после погружения детали в раствор никелирования необходимо создать ее контакт в течение нескольких секунд с железной или алюминиевой проволокой.

Для никелирования применяют как кислые, так и щелочные растворы, содержащие, г/л:

1) сернокислого никеля $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ 20; уксуснокислого натрия $CH_3COOH \cdot 3H_2O$ 10; гипофосфита натрия $NaH_2PO_4 \cdot H_2O$ 10; 98%-ной уксусной кислоты CH_3COOH до pH 4,5÷5 [температура раствора 82-86 °С, плотность загрузки 1 дм^2/л, скорость осаждения 10-12 мкм/ч (раствор одноразового действия)];
2) уксуснокислого никеля $(CH_3COO)_2 \cdot Ni$ 15; гипофосфита натрия $NaH_2PO_2 \cdot H_2O$ 10; 98%-ной уксусной кис-лоты CH_3COOH 6,2-6,5 мл/л (температура раствора 90-94 °С, плотность загрузки 2 дм^2/л, скорость осаждения 10-12 мкм/ч, pH = 4,1÷4,3);
3) сернокислого никеля $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ или хлористого никеля $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ 45; хлористого аммония NH_4Cl 50; лимоннокислого натрия $Na_3C_6H_8O_7 \cdot nH_2O$ 45; гипофосфита натрия $NaH_2PO_2 \cdot H_2O$ 20; 25%-ного аммиака NH_4OH – до pH = 8÷9 температура раствора 75-92 °С, плотность загрузки 1 дм^2/л, скорость осаждения покрытия 18-20 мкм/ч (раствор многоразового действия)]. Корректирование осуществляется концентрированными растворами соли никеля и гипофосфита, а также добавлением аммиака.

Снятие некачественного никелевого покрытия осуществляют в растворе, содержащем: серной кислоты H_2SO_4 (плотность 1,84 г/см^3) 1 объем. доля; азотной кислоты HNO_3 (плотность 1,4 г/см^3) 2 объем. доли; сернокислого (окисного) железа $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$ 5-10 г/л; температура раствора комнатная, плотность загрузки 1 дм^2/л.

Химическое никелирование алюминия применяют для защиты изделий от коррозии, повышения их электропроводности, износостойкости, твердости, обеспечения возможности пайки и др. Процесс может осуществляться как в кислом, так и в щелочном растворе.

Для надежного обеспечения прочности проводят предварительную двойную цинкатную обработку никелируемой поверхности. Первую обработку выполняют в растворе, содержащем, г/л: окиси цинка ZnO 95-105; едкого натра NaOH 450-550. Температура раствора комнатная, время обработки 15-30 с.

После цинкатной обработки снимают цинк в растворе комнатной температуры, содержащем 300-400 г/л азотной кислоты (плотность 1,4 г/см^3) в течение 15-25 с. Затем проводят повторную цинкатную обработку в том же растворе, что и первая цинкатная обработка, и по тому же режиму.

Вместо цинкатной обработки алюминия можно производить его цинкование в аммиакатном электролите, содержащем, г/л: серного цинка $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 50-60; хлористого аммония NH_4Cl 240-280; борной кислоты H_3BO_3 20-25; мездрового клея 1-2. температура раствора 18-25 °С; pH = 5,6÷5,7, катодная плотность тока 0,4-0,7 А/дм^2; время обработки 3-5 мин.

Для подготовки поверхности алюминия перед нанесением покрытия может быть использован также раствор, содержащий хлористый никель $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ 40 г/л;

ортофосфорную кислоту H_3PO_4 (плотность 1,7 г/см^3) 1 л. Температура раствора 40-50 °С, время обработки 10-20 с.

В результате обработки алюминия в первом растворе осаждается ровный слой цинка, а при обработке во втором растворе – слой контактного никеля. По полученным слоям может наноситься покрытие тем или иным способом.

Перед химическим никелированием алюминия на его поверхность под током наносят тонкий слой контактного никеля из раствора хлористого никеля с соляной кислотой, содержащего, г/л: хлористого никеля $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ 200; соляной кислоты HCl 50-80. Катодная плотность тока 2-3 А/дм^2, время обработки 2-3 мин, аноды никелевые.

Обработке должны предшествовать обычные операции подготовки поверхности алюминиевых деталей перед нанесением покрытия: обезжиривание, травление в щелочи, осветление в азотной кислоте.

Операции подготовки поверхности деталей из алюминиевых сплавов марок Д1, Д16, АМц перед *химическим никелированием в кислом растворе* следующие: травление в растворе, содержащем 100 г/л едкого натра и 40 г/л хлористого натрия, при 60 °С в течение 30 с; осветление в течение 5-10 с в 35%-ном растворе азотной кислоты; матирование в течение 60 с в растворе, состоящем из 1 объем. части плавиковой кислоты и 2 объем. частей соляной кислоты; декапирование в течение 60 с в 5%-ном растворе соляной кислоты.

Для химического никелирования алюминия рекомендуется тот же кислый раствор со стабилизирующей добавкой (тиомочевиной), что и для никелирования стали.

Применяют также раствор на основе уксуснокислого никеля следующего состава, г/л: уксуснокислый никель $(CH_3COO)_2Ni$ 15; фосфорноватистокислый натрий (гипофосфит натрия) $NaH_2PO_2 \cdot H_2O$ 10; 98%-ная уксусная кислота CH_3COOH (мл/л) 6,2-6,5; тиомочевина NH_2CSNH_2 0,002-0,003. Температура раствора (90±2) °С, плотность загрузки 2 дм^2/л, скорость осаждения 10-12 мкм/ч, pH = 4,1÷4,3.

Щелочной раствор для никелирования алюминия имеет следующий состав, г/л: сернокислый никель $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ 25 или хлористый никель $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ 25; лимоннокислый натрий $Na_3C_4H_5O_7 \cdot H_2O$ 50; хлористый аммоний NH_4Cl 35; фосфорноватистокислый натрий (гипофосфит натрия) $NaH_2PO_2 \cdot H_2O$ 30; 25%-ный аммиак NH_4OH до pH = 8÷9. Температура раствора 80-88 °С, плотность загрузки 1 дм^2/л, скорость осаждения 18-20 мкм/ч.

После никелирования для снятия внутренних напряжений проводят термическую обработку в течение 1-2 ч при 200-220 °С.

Некачественные никелевые покрытия удаляют электрохимическим способом в растворе следующего состава, г/л: серная кислота H_2SO_4 1070-1200; глицерин $C_3H_8O_3$ 8-10. Температура раствора 20 °С, анодная плотность тока 5-10 А/дм^2 напряжение 12 В, катоды свинцовые.

Химическое никелирование титана проводят с целью улучшения его поверхностных свойств (например, паяемости и др.), а также внешнего вида.

На поверхности титана всегда присутствует оксидная пленка толщиной, примерно равной 4,5÷5,5 мкм. Эта пленка мешает прочному сцеплению покрытия с основой. Кроме того, оксидная пленка быстро восстанавливается после ее удаления. Поэтому нанесение покрытий на титан связано с большими трудностями из-за необходимости специальной подготовки его поверхности.

Для получения прочного сцепления покрытия с основой необходимо не только удалять оксидную пленку, но необходимо и создавать промежуточный слой из контактно-осажденного металла (например, цинка) или из фторидной, или гидридной пленки, предохраняющей титан от окисления.

Удаление оксидных пленок у детали из титана подвергают гидропескоструйной обработке, травлению или обоим видам обработки.

Для создания фторидной пленки детали из титана травят в растворе следующего состава: азотная кислота HNO_3 (плотность 1,4 г/см^3) 250-300 г/л, 40%-ная фтористоводородная кислота HF 125 г/л. Плотность тока 2 А/дм^2, напряжение 2-3 В, катоды из коррозионно-стойкой стали 1Х18Н9Т, время обработки 5 мин. Травить (в течение 3-5 мин) можно также в растворе, содержащем 220-240 г/л серной кислоты (плотность 1,81 г/см^3), температура которого 65-70 °С.

Для получения на поверхности гидридной пленки детали из титана обрабатывают в серной или соляной кислоте или в смесях кислот либо для сокращения времени травления подвергают гидропескоструйной обработке, а затем – травлению в концентрированной серной кислоте при температуре 80 °С в течение 2 мин.

Для создания пленки контактного цинка детали из титана обрабатывают в растворе, содержащем: 800 мл/л этиленгликоль $C_2H_6O_2$; 200 мл/л 40%-ной фтористоводородной кислоты HF; 100 г фтористого цинка ZnF_2. Время обработки без тока 1,5-2 мин при pH = 1÷2 или под током в течение 2-3 мин при катодной плотности тока 0,1-5 А/дм^2.

После обезжиривания и травления в 40%-ном растворе серной кислоты при температуре 80 °С в течение 30 мин или 35%-ной соляной кислоте при температуре 50 °С в течение 20 мин детали из титана погружают на 2-3 с в активирующий раствор, содержащий 220 г/л сернокислого никеля $NiSO_4 \cdot 7H2O$; 120 мл/л соляной кислоты HCl (плотность 1,19 г/см^3); 20-40 г/л фтористого аммония NH_4F. В результате обработки образуется тонкая пленка контактно-осажденного никеля, надежно защищающая поверхность титана от окисления и служащая подслоем для дальнейшего осаждения покрытия. На эту пленку можно наносить покрытия как химическим, так и электролитическим способом.

Химическое никелирование можно осуществлять как в кислых, так и в щелочных растворах, составы которых уже приводились ранее.

Прочность сцепления химического никелевого покрытия с поверхностью титана повышается после термической обработки. Если обрабатываются титановые детали с покрытием из химического никеля при температуре 400 °С в течение 1 ч, то прочность сцепления составляет до 150 МПа (по гидридной пленке, полученной травлением в концентрированной соляной кислоте); а поверхностная твердость максимальна. Обработка при более высокой температуре (600-700 °С) обеспечивает прочность сцепления 200-250 МПа при меньшей твердости.

Химическое никелирование магниевых сплавов. Подготовка поверхности магния для нанесения покрытия вызывает трудности из-за его высокой химической активности.

Растворы химического никелирования, применяемые для нанесения покрытия на другие металлы (сталь, медь и др.), непригодны для химического никелирования магния, так как при химическом никелировании одновременно протекают два процесса – травление магния и осаждение никеля.

Состав раствора для химического никелирования магниевых сплавов содержит, г/л: сернокислого никеля $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ 20; гипофосфита аммония $NH_4H_2PO_2 \cdot$

· H_2O 30; пирофосфорнокислого натрия $Na_4P_2O_7$ · $10H_2O$ 50. Температура раствора 50-70 °С, pH = 9÷10.

Перед химическим никелированием изделия из магниевых сплавов травят в 20-30%-ном растворе едкого натра. После химического никелирования изделия подвергают химической обработке при температуре 150-200 °С в течение 1 ч.

Химическое никелирование цинковых сплавов проводят в щелочном пирофосфатном растворе, содержащем, г/л: никеля хлористого $NiCl_2$ · $6H_2O$ или сернокислого $NiSO_4$ · $7H_2O$ 25-30; гипофосфита натрия NaH_2PO_2 · H_2O или калия KH_2PO_2 · H_2O 25-30; пирофосфата натрия $Na_4P_2O_7$ · $10H_2O$ или калия $K_4P_2O_7$ · · $10H_2O$ 30; карбоната натрия Na_2CO_3 · $12H_2O$ или калия K_2CO_3 40-45. Температура раствора 45-50 °С, pH = 9,5÷10,0; скорость осаждения 10-15 мкм/ч. Необходимого значения pH достигают добавлением аммиака.

Перед никелированием детали обезжиривают в растворе обычного состава, промывают в горячей и холодной воде и обрабатывают в горячем 50%-ном растворе едкого натра в течение 20-30 с.

Химическое никелирование свинца, олова и их сплавов проводят в растворе, в который, кроме обычных составляющих (соли никеля и гипофосфита), вводят фтористый аммоний и диэтаноламин. Никелирование проводят в щелочном растворе, содержащем, г/л: сернокислого никеля $NiSO_4$ · $7H_2O$ 25-35; гипофосфита натрия NaH_2PO_2 · H_2O 15-20; диэтаноламина $C_4H_{11}O_2N$ 50-75; аммония фтористого NH_4F 25-30. Температура раствора 85-95 °С, pH = 8,5÷9,5.

При нанесении покрытия на свинец необходимо контактирование раствора ванны с алюминием.

Химическое никелирование пресс-форм. Перед химическим никелированием пресс-формы обезжиривают в органических растворителях, в горячем щелочном обезжиривающем растворе и декапируют в соляной или серной кислоте. Никелирование проводят в обычном кислом растворе (табл. 8). Места, не требующие покрытия, изолируют лентой ПХВ или эмалью ХВЛ-21.

Термическую обработку никелированных пресс-форм осуществляют при температуре 400 °С в течение 1 ч в вакууме или без вакуума. При термической

8. Составы растворов для химического никель-фосфатирования

Компонент	Содержание (г/л) компонентов для раствора	
	1	2
Сернокислый аммоний	50	48-50
Сернокислый никель	21	21-23
Водный аммиак 25%-ный, мл/л	20	20
Кислота уксусная (ледяная), мл/л	20	20-22
Гипофосфит натрия	24	24-25
Сернистый свинец	0,05	-
Ангидрид малеиновый	0,54	1-1,5
Параметр процесса	**Номер раствора**	
	1	2
Температура, °С	86-88	87-89
Скорость никелирования, мкм/ч	22-24	20-22

обработке в обычной атмосфере на поверхности пресс-форм могут появиться цвета побежалости. Для исключения этого явления на никелированные поверхности пресс-форм перед термической обработкой наносят кистью или тампоном обмазку следующего состава, г/л: окись цинка ZnO 300; борная кислота H_3BO_3 80-100.

При износе пресс-формы в процессе эксплуатации можно производить повторное никелирование без снятия прежнего покрытия. В случае применения пресс-форм, покрытых химическим никелем, для изготовления резиновых изделий во избежание прилипания резины на поверхность пресс-форм наносят силиконовую смазку или натирают ее графитовым карандашом.

Никель-фосфатирование. Химические никель-фосфорные покрытия могут быть использованы: для повышения коррозионной стойкости изделий; создания лучших декоративных (по сравнению с гальваническим никелированием) качеств; повышения износостойкости новых и восстановления работоспособности изношенных деталей (в том числе и инструмента – калибров, пресс-форм, штампов и т.п.); поверхностного упрочнения деталей различного назначения; повышения эксплуатационной надежности, позволяющей увеличить долговечность работы деталей в 3-7 раз; создания подслоя под пайку деталей; замены более дорогих и дефицитных высоколегированных сталей и цветных металлов на простые углеродистые стали с никелевым покрытием.

Улучшение режущих свойств и стойкости инструментов обеспечивают нанесением на их режущую часть износостойких никель-фосфорных покрытий. Осаждение покрытия осуществляют химическим способом в аммиачно-никелевой цитратной ванне состава, г/л: хлористый никель 30, гипофосфат натрия 10, хлористый аммоний 100. Для поддержания кислотности в пределах pH = 8 ÷ 9 добавляют аммиак. Процесс химического осаждения осуществляется в ванне при температуре 85 °С. В течение 30 мин на поверхности режущего инструмента осаждается слой никель-фосфора толщиной 5 мкм.

Технологический процесс нанесения покрытия содержит следующие операции: промывку и обезжиривание химическим способом, химическое осаждение никель-фосфорного покрытия, термическую обработку инструмента с нанесенным никель-фосфорным покрытием, нагрев до температуры 400-450 °С с последующим охлаждением на воздухе.

Изделия по достижении необходимой толщины покрытия вынимаются из ванны и промываются в проточной горячей воде. В процессе работы раствор проверяют и корректируют. Раствор считают пригодным к работе до наступления помутнения. Корректирование раствора проводят по результатам химического анализа на содержание соли никеля.

Перед взятием пробы в рабочую ванну необходимо долить испарившуюся воду до специальной метки. Анализ раствора на содержание сернокислого никеля в растворе определяют по изменению оптической плотности кроющего раствора с применением фотоколориметра марки ФК. Для этого в две кюветы фотоколориметра вместимостью 50 мл наливают тщательно отфильтрованный исходный раствор, устанавливают "0" гальванометра; одну из кювет вынимают, промывают и наливают в нее отработанный раствор, также тщательно отфильтрованный. После этого стрелка гальванометра должна отклониться от нуля. В эту кювету мерной пипеткой вводят корректирующий раствор (с содержанием никеля 500 г/л) до тех пор, пока стрелка гальванометра не станет на "0". В зависимости от введенного количества корректировочного раствора делают пере-

счет на рабочую ванну в граммах на литр. Гипофосфит натрия вводят пропорционально из расчета, что на 5,5 г израсходованного никеля требуется 5,65 г гипофосфита натрия.

Сернокислый аммонит вводят через одно корректирование в количестве, равном массе никеля; уксусную кислоту – через две-три корректировки из расчета 1-2 мл на литр раствора. Малеиновый ангидрид добавляют по 1 г/л во время каждой корректировки. Величину pH устанавливают, применяя 10%-ный раствор аммиака.

Для раствора № 1 (см. табл. 8) готовят уксусную кислоту и сульфит свинца. Полученный раствор сульфида свинца и уксусную кислоту вводят из расчета 1 мл на 150 мл корректируемого раствора.

Технологический процесс нанесения покрытия содержит операции: промывку и обезжиривание химическим способом, химическое осаждение никель-фосфорного покрытия, термическую обработку инструмента с нанесением никель-фосфорного покрытия, нагрев до температуры 400-450 °С с последующим охлаждением на воздухе.

Контроль толщины покрытия осуществляют либо по замеру его толщины, либо по увеличению массы образца-свидетеля, который помещают в ванну вместе с деталями. Он должен быть изготовлен из того же материала, что и остальные детали. После никелирования детали должны быть гладкими, блестящими, без пузырей, набросов и вздутий.

Снятие недоброкачественного никелевого покрытия с деталей из стали и медных сплавов проводят в растворе следующего состава: 1 объем, часть серной кислоты (плотность 1,84 г/см^3), 2 объем, части азотной кислоты (плотность 1,4 г/см^3), 5-10 г/л сернокислого (оксидного) железа.

Процесс ведут при комнатной температуре с соблюдением плотности загрузки 1 дм^2/л. Допускается производить повторное химическое никелирование со следующей подготовкой поверхности: обезжиривание в венской извести, тщательная промывка, декапирование в соляной кислоте (плотность 1,19 г/см^3) с концентрацией 500 мл/л при температуре (20±5) °С в течение 0,5 мин, промывка.

Термическая обработка химического никеля оказывает большое влияние на его свойства. Осадки химически осажденного никеля непосредственно после их получения имеют аморфную структуру, которая при нагреве переходит в кристаллическую. Максимальная твердость (120-980 HV) достигается термической обработкой при температуре 400 °С. В процессе нагрева в никеле образуются фазы твердого фосфора и кристаллы интерметаллического соединения.

Для снятия внутренних напряжений в покрытии и улучшения сцепления покрытия с поверхностью основного металла осуществляют нагрев деталей до температуры 200-220 °С в течение 2 ч.

В результате термической обработки твердость покрытия почти достигает твердости хрома, улучшается прочность его сцепления с основой, увеличивается износостойкость и коррозионнная стойкость в различных химических средах.

Оборудование для осаждения химического никеля. При небольших объемах растворов (до 50 л) можно применять стеклянные колбы, фарфоровые бачки, эмалированные чугунные котлы и металлические ванны, футерованные внутри. Материалы для футеровки должны выдерживать температуру до 100 °С, быть кислотостойкими и теплопроводными. Такими материалами могут быть фторо-

пласт, пентапласт, кобальтовая эмаль, стекло, а также мастики на основе хлорвиниловых и эпоксидных смол.

Преимущества никель-фосфорных покрытий – уменьшение силы трения при резании, резкое снижение температуры резания, облегчение выхода стружки, обеспечение высокой износостойкости инструмента. Высокая твердость режущей кромки инструмента (65-68 $HRC_э$) сохраняется при температуре выше 600 °С. Покрытие особенно ценно при упрочнении и восстановлении инструментов сложной геометрической формы, перезаточка которых проводится по задней поверхности (например, для сверла диаметром 8-35 мм).

Применяемость никель-фосфатных покрытий для упрочнения деталей в соответствии с условиями эксплуатации можно расширить легированием покрытий. Для этого в основной раствор для химического никелирования вводят соли легирующих металлов.

Никель-кобальт-фосфатирование выполняют в целях повышения износостойкости и антифрикционных свойств стальных деталей сложной конфигурации (пресс-формы, измерительный инструмент, крышка клапана, поршень и др.), работающих в условиях трения, при повышенных температурах.

Шероховатость поверхности пресс-формы, на которую наносят никель-кобальт-фосфорное покрытие, Ra = 0,040÷0,32 мкм, так как рельеф поверхности покрытия воспроизводит геометрию поверхности детали. Технологические операции по нанесению никель-кобальт-фосфорного покрытия выполняют в следующем порядке:

- химическое обезжиривание в щелочном растворе состава, г/л: едкий натр 40-60; кальцинированная сода 60-70; тринатрийфосфат 20-30; натриевое жидкое стекло 5-9; температура раствора 65-75 °С; продолжительность обработки 27-33 мин;
- промывка в горячей (70-80 °С) проточной воде;
- промывка в холодной проточной воде;
- обезжиривание окисью магния; окись магния смешивают с холодной водой до консистенции негустой кашицы и волосяной щеткой тщательно протирают обрабатываемую поверхность, например пресс-формы, до полного смачивания поверхности;
- промывка в холодной проточной воде до полного удаления окиси магния;
- сушка пресс-формы горячим (70-80 °С) сжатым воздухом, если следующей операцией будет изолирование непокрываемых участков; если же на все поверхности пресс-формы наносится покрытие, то сушка исключается; изолирование участков поверхности пресс-формы, не подлежащих покрытию, осуществляют эмалью ХВ-124, которую наносят кистью; сушку эмалевого покрытия выполняют при нормальной температуре в течение 30 мин, а затем 2 ч при температуре 80-120 °С;
- электрохимическое обезжиривание на катоде в щелочном растворе состава, г/л: едкий натр 25-35; кальцинированная сода 25-35; тринатрийфосфат 15-25; жидкое натриевое стекло 5-15; температура 65-75 °С; плотность тока 4-10 А/дм^2; продолжительность обработки 4-6 мин; анодами для обезжиривания служат пластины из катодного никеля Н-2; состав щелочных растворов для химического и электрохимического обезжиривания контролируют не реже одного раза в неделю при односменной работе;

- промывка в горячей (70-80 °С) проточной воде;
- промывка в холодной проточной воде последовательно в двух ваннах; смену воды в промывочных ваннах осуществляют со скоростью 0,7-1 объема в ч; очистку ванн следует проводить не реже одного раза в месяц;
- декапирование в растворе серной кислоты (100 г/л); температура 20-25 °С, продолжительность 2 мин;
- промывка в холодной дистиллированной воде последовательно в двух ваннах;
- нанесение химического никель-кобальт-фосфорного покрытия; в состав раствора входят следующие компоненты, г/л: хлористый никель 15; сернокислый кобальт 15; лимонная кислота 20; хлористый аммоний 50; едкий натр 50; фосфорноватистокислый натрий (гипофосфат) 20; температура раствора 83-87 °С, pH раствора 9-10; скорость осаждения 16-18 мкм/ч; плотность загрузки 1 $дм^2$/л.

Для получения никель-кобальт-фосфорных покрытий толщиной более 18 мкм осаждение проводят в стационарной ванне. Через 1 ч пресс-форму из отработанного раствора переносят в свежеприготовленный или откорректированный по данным химического анализа раствор. Из указанного выше раствора осаждается сплав, содержащий, % (мас. доля): никеля 70-75; кобальта 10-15; фосфора 10-15. Компоненты раствора для получения химического никель-кобальт-фосфорного покрытия следует растворять каждый отдельно в теплой дистиллированной воде при температуре 50-60 °С, едкий натр и гипофосфит натрия – в воде нормальной температуры. Через фильтр из марли и ваты растворы солей сливают в последовательности: вначале раствор хлористого никеля, затем раствор сернокислого кобальта; затем добавляют растворы лимонной кислоты, хлористого аммония и едкого натра. Полученный сложный раствор нагревают до температуры 60-65 °С и в него вводят растворенный в минимальном количестве воды гипофосфит натрия. Температуру раствора доводят до 80 °С, после чего в него загружают деталь. Подвеску для загрузки деталей изготовляют из стальной проволоки.

Ванна для нанесения химического никель-кобальт-фосфорного покрытия на поверхности пресс-форм может быть изготовлена из керамики, фарфора и стекла. Можно использовать в качестве ванн чугунные котлы, а также эмалированные бачки. В процессе нанесения покрытия интенсивно выделяется водород. Для получения покрытия без питтинга необходимо встряхивать и покачивать пресс-форму непосредственно в растворе или перемешивать раствор с помощью сжатого воздуха.

После нанесения покрытия детали промывают в проточной воде нормальной температуры и в воде при температуре 70-80 °С, сушат горячим (70-80 °С) сжатым воздухом и подвергают термической обработке в электрической печи. Пресс-формы с покрытием выдерживают в электрической печи при температуре 325-350 °С в течение 1 ч, а затем охлаждают вместе с печью при открытой дверце. В результате прочность сцепления покрытия с основой превышает прочность сцепления никелевого и хромового покрытий, полученных электролитическим способом. При нагреве покрытых пресс-форм до температуры 325-350 °С образуется двухфазная система, состоящая из Ni_3P и CO_2P. Структурные превращения сопровождаются увеличением твердости покрытия от 500-600 HV (до термообработки) до 1000-1100 HV (после термообработки), т. е. покрытие по твердо-

сти приближается к электролитическому хромовому. Пористость покрытия при толщине 16-18 мкм и более не выявлена.

Пресс-формы, покрытые никель-кобальт-фосфорным сплавом, используют для прессования пластических масс и резин. При прессовании резин не наблюдается прилипания поверхности прессуемой детали к поверхности пресс-формы.

В табл. 9 приведены составы растворов, в которых можно осаждать Ni-Co-P-покрытия на изделия из различных материалов (температура ванны 90-92 °С). Зависимость толщины покрытий из состава раствора и продолжительности кобальтирования характеризуется данными табл. 10. Скорость осаждения Ni-Co-P-покрытий (14-30 мкм/ч) сравнима со скоростью осаждения Ni-P-покрытий. Максимум наблюдается, когда в растворе содержится по 25 г хлористого никеля и хлористого кобальта. Растворы можно корректировать теми же методами, что и для Ni-P-покрытий. Ni-Co-P-покрытия можно осаждать на детали из железных, медных и алюминиевых сплавов, а также из неметаллов. Покрытия блестящие, светлые с серебристым оттенком; типичная для никелевых осадков желтизна отсутствует. Толщина осадков на деталях любой конфигурации равномерная. Составы этих покрытий зависят от соотношения концентрации солей Ni и Co в растворе. При отношении, равном 1 : 1, в осадке содержится около 65% Ni, при соотношении 1 : 2 – около 50% Ni. Отношение Ni/Co в сплаве обычно в 1,4 раза больше, чем в растворе.

Ni-C-P-покрытия осаждают из раствора, содержащего, г/л: хлористого никеля 20; гипофосфита натрия 20; лимоннокислого натрия 50; хлористого аммония 40; сернокислой меди 1,6; pH = 8,8÷9,0; = 80 °С. Введение в раствор до 1,6 г/л сернокислой меди приводит к снижению магнитной индукции. При даль-

9. Состав растворов (pH = 8,3÷8,5) для получения Ni-Co-P-покрытий

Компоненты состава	Содержание компонентов (г/л) для раствора					
	1	2	3	4	5	6
Хлористый никель	18	15	12	10,5	9	25
Хлористый кобальт	3	6	9	10,5	12	25
Гипофосфит натрия	24					
Хлористый аммоний	30					
Лимоннокислый натрий	45					
Аммиак (25%-ный), мл/л	50-60					

10. Зависимость толщины Ni-Co-P-покрытий от состава раствора и продолжительности кобальтирования

Номер раствора	Толщина покрытия (мкм) при продолжительности процесса, мин		
	30	60	90
1	11-12	20	26
2	9-10	16-17	20
3	8-9	13-14	18
4	7-8	15-16	19
5	7-8	14-15	20
6	15	24-25	30

нейшем увеличении концентрации меди содержание фосфора в покрытиях превышает 12% и они немагнитны.

Ni-Fe-P-покрытия в виде тонких двухслойных пленок магнитомягкого сплава создают из растворов следующего состава, г/л:

- хлористый никель 30; хлористое железо 20; калий-натрий виннокислый 50; гипофосфит 25;
- те же компоненты, но при концентрации хлористого железа, 11 г/л.

Температура процесса в обоих случаях 75-90 °С; pH ≈ 11,0.

Ni-Re-P-покрытия получают из кислых растворов (pH ≈ 5,0), составы которых приведены в табл. 11. Процесс ведется при 90-92 °С.

Ni-Co-W-P-покрытия можно получить из хлоридных или сульфидных растворов. Состав хлоридного раствора, г/л: хлористый никель 15; хлористый кобальт 15; вольфрамовокислый натрий 8; гипофосфит натрия 20; лимоннокислый натрий 35; хлористый аммоний 30; аммиак 25%-ный до pH = 9,5. Температура раствора 88-90 °С, скорость осаждения 12 мкм/ч. Состав сульфатного раствора, г/л: сернокислый никель 10; сернокислый кобальт 10; вольфрамовокислый натрий 30; гипофосфит натрия 20; лимоннокислый натрий 35; сернокислый аммоний 30; аммиак 25%-ный до pH = 10. Температура раствора 91-92 °С; скорость осаждения 11,5 мкм/ч (табл. 12).

11. Составы растворов для осаждения Ni-Re-P-покрытий

Номер раствора	Содержание, г/л				Толщина покрытия (мкм) за время осаждения, мин	
	Хлористого никеля	Гипофосфита натрия	Уксусно-кислого натрия	Перрената калия	30	60
1	21	24	10	1,5	10,0	12,3
2	21	24	10	3,0	10,0	10,1
3	21	24	10	4,5	8,1	9,8

12. Составы растворов для получения Ni-W-P и Ni-Co-W-P-покрытий (температура раствора 88-90 °С), параметры процесса нанесения покрытия

Компонент	Содержание (г/л) компонентов для раствора			
	1	2	3	4
Сернокислый никель	-	10-12	-	10
Сернокислый кобальт	-	-	-	10
Хлористый никель	22-24	-	15	-
Хлористый кобальт	-	-	15	-
Сернокислый аммоний	-	5-6	-	30
Хлористый аммоний	35	-	30	-
Гипофосфит натрия	20-22	12-15	20	20
Вольфрамовокислый натрий	6-7	40-41	8	30
Лимоннокислый натрий	40-45	40-45	35	35
Аммиак (25%-ный раствор) до pH	9,7-10	9,7-10	9,5-10	9,5-10
Параметр процесса	**Номер раствора**			
	1	2	3	4
Скорость осаждения, мкм/ч	9-10	6-7	11-12	8-9

Технологический процесс получения многокомпонентных покрытий не имеет принципиальных отличий от процесса химического никелирования. Изделия в зависимости от материала, из которого они изготовлены, подвергаются соответствующей предварительной подготовке (очистке, обезжириванию, травлению, декапированию и т. п.), после чего загружаются в ванну с раствором.

Никель-борирование, применяемое для повышения износостойкости, твердости и коррозионной стойкости металла, выполняют в растворе, содержащем, г/л: хлористого никеля 80-100; этилендиамина 114-120; едкого натра 40-50; боргидрида натрия 0,8-0,9; фенантролина 0,02-0,25. Покрытия обладают высокой коррозионной стойкостью, износостойкостью и твердостью, фактически беспористые при толщине слоя 5-7 мкм. Другой состав раствора, г/л: хлористый никель 30; этилендиамин 60; едкий натр 40; боргидрид натрия 0,6; азотнокислый таллий 0,1. Составы других растворов для осаждения Ni-B и Co-B-покрытий даны в табл. 13 и 14.

В случае, когда Ni-B-покрытие используют для изготовления паяных деталей, можно применять состав [а. с. 740860 (СССР)], содержащий, г/л: хлористого никеля 10-20; этилендиамина 20-40; едкого натра 20-30; боргидрида натрия 0,9-1,1; азотно-кислого таллия 0,09-0,11; сернокислого гидразина 0,9-1,1; маннита 5-15.

Введение в раствор серно-кислого гидразина и маннита обеспечивает получение светло-серого покрытия с малым содержанием бора. Покрытие обладает свойством создавать высококачественные паяные соединения. Применяют следующие компоненты: никель хлористый $NaCl_2$-$6H_2O$; этилендиамин – 70%-ный

13. Растворы для осаждения Ni-B и Co-B-покрытий при использовании в качестве восстановления борогидрида натрия, параметры процесса нанесения покрытия

Компонент состава	Содержание (г/л) компонентов в растворах					
	1	2	3	4	5	6
Хлористый никель	30	20	20	-	-	-
Сернокислый никель	-	-	-	33	-	-
Хлористый кобальт	-	-	-	-	10	73
Борогидрид натрия	0,6	0,67	0,67	1	0,5	6,0
Триэтилентетрамин	-	-	-	87	-	-
Едкий натр	40	40	40	40	40	-
Этилендиамин (98%-ный)	60	-	45	-	-	-
Сегнетова соль	-	65	-	-	-	-
Стабилизирующая добавка	0,02	-	-	-	-	-
Трилон Б	-	-	-	-	35	-
Хлористый аммоний	-	-	-	-	-	61
Аммиак (25%-ный раствор) до необходимой pH	14	12-14	11	12-14	12-14	12-14
Параметр процесса	**Номер раствора**					
	1	2	3	4	5	6
Температура раствора t, °C	90-95	97	97	97	92	95
Скорость осаждения, мкм/ч	10-30	1,5	10,0	2,5	1,0	12,5
Материал основы	сталь, медь, керамика	медь	сталь, бронза, медь	сталь, медь	сталь, медь	сталь

14. Растворы с боразотными восстановителями для осаждения Ni-B и Co-B-покрытий, параметры процесса нанесения покрытия

Компоненты состава	Содержание (г/л) компонентов в растворах				
	1	2	3	4	5
Хлористый никель	24-48	94	170	24	-
Хлористый кобальт	-	-	-	-	180
Диметилборазан	3-4,8	9,5	37	-	37
Триметилборазан	-	-	-	23	-
Уксусная кислота + уксуснокислый натрий (моль/л)	0,15-0,3	-	-	-	-
Лимоннокислый натрий	-	-	-	87	-
H_3BO_3	-	-	25	-	25
Параметр процесса	**Номер раствора**				
	1	2	3	4	5
pH раствора	5-5,5	5,4	4,3	6,5	4
Температура раствора, °С	70-75	18	18	98	18
Скорость осаждения, мкм/ч	20-25	1	2	1,8	6
Материал основы	Сталь, медные сплавы	Сталь		Сталь, медные сплавы	Сталь

водный раствор $C_2H_8N_2$; едкий натр NaOH; боргидрид натрия $NaBH_4$; азотнокислый таллий $TlNO_3$, гидразин сернокислый $Na_2H_4SO_4$; маннит $C_6H_{14}O_6$.

Приготовление раствора: в 1/2 объема дистиллированной воды, нагретой до температуры 30-40 °С, растворяют хлористый никель и добавляют этилендиамин; в отдельной емкости растворяют едкий натр, часть его добавляют в раствор хлористого никеля с этилендиамином, а в другой части растворяют восстановитель – боргидрид натрия; раствору дают остыть и сливают его, перемешивая, в основной раствор, содержащий хлористый никель, этилендиамин и едкий натр; затем вводят сернокислый гидразин и маннит; раствор тщательно размешивают и выдерживают сутки.

Нанесение покрытия осуществляют при температуре 93-97°С (pH = 12÷13), плотности загрузки 1,6-3,2 $дм^2$/л и периодическом встряхивании в течение 30 мин. Скорость осаждения покрытия 8,7-9,2 мкм/ч, толщина покрытия 6-10 мкм.

Перед нанесением покрытия осуществляют обычную предварительную подготовку поверхности в зависимости от типа покрываемого материала.

При росте концентрации борогидрида натрия в растворе от 0,6 до 1,8 г/л возрастает и скорость осаждения покрытий. Однако стабильность раствора, особенно при температуре процесса 90-95 °С, снижается и возникает опасность его разложения. Поэтому в исходном растворе целесообразно иметь 0,6-0,8 г/л борогидрида натрия, а в ходе никелирования постепенно увеличивать его концентрацию.

Осаждение покрытий из борогидридных растворов возможно лишь при pH = 1÷14. При pH < 10 раствор разлагается. С повышением температуры процесса должна соответственно увеличиваться и pH, что также способствует росту скорости реакции. Для создания требуемой щелочной среды могут быть использованы гидроокиси щелочных металлов или тетраметиламмония, а также хлористый аммоний. Возможное при высокой щелочности снижение стабильности

раствора и выпадение в осадок гидрооксида металла предотвращается введением комплексообразователей, например, аминов или аммиака. Последние также могут обеспечить требуемое pH.

При повышении концентрации едкого натра с 20 до 60 г/л скорость осаждения покрытий увеличивается; добавление в этом случае в раствор стабилизирующей добавки (соединения $TlNO_3$) способствует сохранению оптимального значения pH и соответственно оптимальной концентрации восстановителя (борогидрида натрия). Это препятствует его непроизводительному расходу в побочной реакции гидролиза и повышает скорость осаждения покрытия до 15-20 мкм/ч.

В качестве *комплексообразующей добавки* в борогидридных растворах используют главным образом этилендиамин. Увеличение молярного соотношения концентраций этилендиамина и хлористого никеля повышает скорость осаждения покрытия. Так, при их отношении, равном 8 : 1 или 10 : 1, скорость осаждения покрытия достигает 25 мкм/ч. Возрастает также и стабильность растворов.

Стабилизаторы, используемые в отдельности или совместно, повышают стабильность раствора с 55-60 до 90-95%; количество осажденного на изделиях покрытия увеличивается от 75-80 до 150-200 мг. Рекомендуется применять стабилизаторы с более широким пределом концентраций, особенно смешанные: меркаптофталевую кислоту (0,5 г/л) и ацетат свинца (0,04 г/л). При использовании раствора, содержащего: хлористого никеля 30, борогидрида натрия 1, этилендиамина 60 мл/л, pH раствора составляет 13-13,5, а температура 90-95 °С. Пределы допустимых концентраций серосодержащих добавок зависят от их природы и колеблются от 0,0003 (для тиофена) до 10 г/л (для меркаптофталевых кислот). Содержание бора в Ni-B-покрытиях в зависимости от состава раствора указано в табл. 15; скорость осаждения Ni-B-покрытия в зависимости от вида стабилизирующих добавок в растворы – в табл. 16; температурные режимы использования растворов с боразотными восстановителями – в табл. 17.

15. Состав растворов и содержание бора в Ni-B-покрытиях, параметры процесса нанесения покрытия

Компоненты состава	Содержание (г/л) компонентов в растворах				
	1	2	3	4	5
Хлористый никель	30	30	30	30	12
Этилендиамин (70%-ный), мл/л	86	86	86	-	4
То же (50%-ный), мл/л	-	-	-	120	-
Гидроокись натрия	40	40	40	40	4
Борогидрид натрия	1,2	1,2	1,2	1	-
Фтористый натрий	-	-	-	1	-
Ацетат таллия	-	0,1	-	0,1	-
Ацетат свинца	-	-	0,04	0,04	-
2-меркаптобензотиазол	-	-	0,005	-	-
Борогидрат тетраметиламмония	-	-	-	-	2
Пирофосфат калия	-	-	-	-	50
Тиосульфат натрия	-	-	-	-	0,012
Содержание бора, % (мас. доля)	5,7	4,3	6,4	6,0	6,0
Параметр процесса	**Номер раствора**				
	1	2	3	4	5
pH раствора	13-14	13-14	13-14	13-14	13-14
Температура раствора, °С	95	95	95	98	60

16. Скорости осаждения Ni-B-покрытия в зависимости от вида стабилизирующих добавок в растворы

Стабилизатор	Оптимальная концентрация в растворе, г/л	Скорость осаждения покрытия, мкм/ч
Тиогликолевая кислота	0,001	6
Тиодигликолевая кислота	0,8	6
Тиофенол	0,0003	6
Тиосалициловая кислота	0,04	12
Ацетат таллия	0,1	28
Ацетат свинца	0,04	18

17. Рекомендуемые температурные режимы для растворов никелирования с боразотными восстановителями

Восстановитель	Температура раствора, °С
Монометилборазан	25-35
Диметилборазан	27-38
Диэтилборазан	70-80
Триметилборазан	60-80

Эпиламирование

Эпиламирование выполняют в специальных растворах с поверхностно-активными веществами, снижающими количество поверхностной энергии, степень адгезии контактирующих материалов, локализующих поверхностные микротрещины, и ограничивающими возможность их роста. Основная особенность вещества этого класса – высокая адсорбционная способность, в результате которой на обрабатываемой поверхности образуются разделительные барьерные пленки с очень низким запасом поверхностной энергии – *эпиламы*.

Эпиламирующие растворы – это растворы с высокомолекулярными фторсодержащими поверхностно-активными веществами во фторсодержащих растворителях – хладоне 113, смеси хладонов 112 и 113, хладоне 114В2 и др. Из раствора фтор адсорбируется на поверхности в виде мономолекулярного или близкого к нему по своим свойствам слоя, резко снижая микротвердость поверхностного слоя и, следовательно, поверхностное напряжение и запас энергии.

Эпиламирующий состав является бесцветной подвижной жидкостью, негорючей, малотоксичной, плотность которой 1570-1590 кг/м^3, а вязкость $1 \cdot 10^{-3} \div 1{,}20 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Нерастворим в углеводородных растворителях. Смазочные масла в эпиламированных узлах трения прочно удерживаются в рабочей зоне. Штамповый инструмент после эпиламирования смазывают минеральным маслом. Эпиламированные режущие инструменты используют с применением СОЖ или с введением любого минерального масла в зону резания.

Технология обработки составом проста, не требует специального оборудования, высокопроизводительна, может быть использована непосредственно на рабочем месте в производственных условиях при температуре окружающей среды. Высокоэффективную эпиламирующую обработку применяют с целью повышения износостойкости поверхностей деталей машин и особенно для увеличения стойкости инструментов всех типов, используемых в различных отраслях промышленности при обработке металлов резанием, вытяжке, прокатке, штам-

повке, прессовании, в том числе деталей из органических материалов, а также при формообразовании и вулканизации изделий из резины и каучука и т. п. Изнашивание трущихся поверхностей снижается от 2 до 40 раз (в зависимости от характера работы узла). Износостойкость режущих инструментов, инструментов для обработки металлов давлением повышается до 20 раз.

Технологический процесс эпиламирования содержит следующие операции. Вначале с поверхностей деталей удаляют грязь, стружку, иные механические примеси, обезжиривают их в хладоне 113, спирте, ацетоне, бензине или подобных растворителях. Далее детали или инструменты погружают в емкость с хладоном либо тщательно протирают тампоном, смоченным в растворителе. Сушат детали на воздухе в течение 5-8 мин. Проводят эпиламирование. Детали погружают в эпиламирующий раствор на 5-7 мин при температуре окружающей среды. Раствор желательно периодически перемешивать. Емкость с раствором закрывают для предотвращения испарения растворителя. Состав можно наносить тампоном на обезжиренные поверхности 2-3 раза. После эпиламирования детали сушат на воздухе 5-10 мин. При необходимости длительного хранения детали после эпиламирования покрывают слоем консервирующего смазочного материала. Во избежание улетучивания растворителя состав хранят при температуре не более 30 °С, вдали от нагревательных приборов и действия прямых солнечных лучей, в герметичной таре – бутылях, бочках, бидонах и т. п. Особых условий транспортирования раствора не требуется.

Работы по обезжириванию хладоном 113 и обработке эпиламирующим составом следует проводить, соблюдая меры безопасности, соответствующие требованиям, предъявляемым к работе с этим хладоном, который относится к малотоксичным соединениям 4-го класса опасности. Предельно допустимая концентрация хладона 113 в рабочей зоне производственных помещений до 3000 мг/м^3. Хладон 113 негорюч, невзрывоопасен. Под действием открытого огня разлагается с образованием высокотоксичных веществ, поэтому в помещении, где проводятся работы с хладоном 113 или эпиламирующими составами, запрещается курить и проводить работы с открытым огнем.

Упрочнение твердыми смазками

Стойкость режущих, волочильных, штамповых и других инструментов может быть увеличена покрытием их плотно прилегающими *твердыми смазками,* снижающими коэффициент трения между режущей кромкой инструмента и обрабатываемой деталью и улучшающими стружкообразование. На стабильность получаемых результатов существенное влияние оказывает геометрия упрочняемых инструментов, применение или отсутствие СОЖ в процессе резания, давление СОЖ, метод нанесения покрытий, обрабатываемый материал. Составы твердых смазок для покрытий на основе алюминиевого фосфата и трехокиси хрома, в которых содержатся субмикронные частицы дисульфида молибдена, приведены в табл. 18. Водородный показатель составов 1 и 2 равен 1,5; плотность, соответственно, 1,37 и 1,22 г/см^3. Отношение отвержденной смазки к связующему материалу для состава № 1 составляет 3 : 2, для состава № 2 3:1. Покрытия из твердых смазок характеризуются отсутствием взаимодействия с СОЖ (в частности, с горячим маслом), хорошими адгезионными свойствами к различным металлам, высокими абразивными износо- и теплостойкостью, твердостью.

18. Состав молибденовых твердых смазок для упрочнения инструментов

Компонент	Содержание [%(мас. доля)] компонента для раствора	
	1	2
Раствор моноалюминиевого фосфата (52%-ный)	24,7	12,35
Трехокись хрома	1,3	0,65
Дисульфид молибдена	20,0	20,0
Алкиловый фенолополиглюколевый спирт	0,4	0,4
Вода	53,6	66

Стойкость инструментов после покрытия твердой смазкой увеличивается в среднем в несколько раз, т. е. стойкость фрез увеличивается в 2,65 раза, метчиков – в 2,76 раза, сверл – в 1,60 раза, червячных фрез – в 1,31 раза, твердосплавных пластин – в 1,5 раза, холодновысадочного инструмента – в 3,6 раза, вырубного инструмента – в 2,0 раза. Твердые смазки для инструментов должны обладать высокой прочностью при растяжении и скручивании, хорошей смачиваемостью. Специфические свойства алкилового полиглюколевого спирта позволяют использовать его в качестве диспергирующего агента и поверхностно-активного вещества; поверхностно-активное вещество – жидкое неионное, точка помутнения 33 °С; активный уровень 100%, точка затвердения 5 °С; плотность 1,055 г/см^3 (при 25 °С).

Дисульфид молибдена как смазывающий пигмент имеет следующую характеристику: диаметр частиц 0,75 мкм; нерастворимость аммиака 2,0%, минимальное водородное число 3; максимальное – 8; абразивность отсутствует; отсутствие коррозии на медной пластинке. Состав № 1 применяют при работе инструментов с СОЖ, состав № 2 – при работе без СОЖ. Покрытия с содержанием 20-90% дисульфида молибдена имеют минимальный коэффициент трения. Влияние дисульфида молибдена на другие свойства покрытия показано в табл. 19.

Инструмент перед нанесением твердой смазки промывают растворителем и обезжиривают. Покрытие наносят кистью, окунанием или распылением. Перед нанесением и в процессе нанесения состав нужно тщательно перемешать. При любом методе нанесения толщина покрытия приблизительно равна 0,005 мм. Возможно и более тонкое покрытие, если материал смазки разжижен водой. Увеличение толщины покрытия максимально до 0,025 мм возможно при многослойном покрытии, при этом необходимо промежуточное просушивание. Рекомендуется просушивание в течение 10 мин на воздухе или 2-3 мин при температуре 60 °С.

19. Влияние дисульфида молибдена на свойства покрытия

Отношение смазка: связывающий металл	Пористость	Смачиваемость	Условия работы	
			Без СОЖ	С применением СОЖ
9 : 1	Высокая	Плохая	Плохие	Плохие
4 : 1	Незначительная	Прекрасная	Хорошие	Хорошие
3 : 1	То же	Хорошая	Отличные	»
1,5 : 1	Нет	Отличная	Хорошие	Отличные
0,25 : 1	»	»	»	Хорошие
0,11 : 1	»	»	Плохие	Плохие

Покрытие при просушивании меняет цвет с темно-серого на светло-серый. Во время нанесения покрытия изделие должно иметь температуру 15-30 °С. Состав можно нагревать и до 60-80 °С, если необходимо прочное многослойное покрытие. Для отвердения покрытия после его нанесения можно выдержать 1 ч при температуре 200-250 °С или 3 ч при температуре 180 °С. Для нанесения покрытия методом распыления используют обычные краскопульты.

Твердая паста [пат. 51103 (Румыния)], наносимая на режущую кромку и переднюю поверхность режущих инструментов в зоне износа, содержит, % (мас. доля): дисульфида молибдена 30-50; графита 2,0-10,0; сульфида сурьмы 0,5-2,5; органического связующего материала (парафина, пчелиного воска и т. п.) 37,5-67,5. Для приготовления пасты в сосуде соответствующей вместимости расплавляют 525 г органической связки, добавляют 60 г графита и тщательно размешивают, после чего вводят 400 г дисульфида молибдена и 15 г сульфида сурьмы и перемешивают до полного затвердения. Из пасты вырезают столбики-карандаши толщиной 10 и длиной 80 мм. После выдержки в течение 24 ч при пониженной температуре карандаши закругляют с одного конца и погружением второго конца окрашивают краской на основе нитроцеллюлозы. Нанесение пасты на режущую кромку инструмента осуществляют, когда кромка чуть нагрета после заточки.

Использование твердых смазок при упрочнении стальных деталей механическими методами, например поверхностным пластическим деформированием, на поверхности возможно возникновение различных дефектов, прижогов, схватывания материала инструмента и детали, поверхностного отпуска и др. Повысить износостойкость и контактную выносливость поверхности, упрочняемой методом пластического деформирования, возможно, если на нее предварительно нанести твердую смазку [а. с. 791777 (СССР)]. Перед пластическим деформированием проводится предварительная обработка упрочняемой детали, например, стальными щетками. Для этого деталь 15 мин выдерживают в кипящем водном растворе, содержащем 20-30 г/л боровольфрамовокислого кобальта, затем нагревают в масле (например, вазелиновом) при температуре 160-180 °С в течение 50-60 мин. После такой обработки на поверхности образуется модифицированный слой, являющийся твердой смазкой, которая, снижая коэффициент трения, создает благоприятные условия для пластической деформации поверхностного слоя, способствует повышению качества поверхности, увеличению контактной выносливости и износостойкости детали при ее эксплуатации.

Обработку стального инструмента ангидридом молибдена выполняют с целью повышения стойкости стальных режущих инструментов [а. с. 277501 (СССР)). После обработки на инструменте образуется антифрикционный и антикоррозионный слой повышенной твердости, состоящий из интерметаллических железомолибденовых соединений; термическая стойкость слоя до 700 °С.

Для нанесения покрытия окончательно обработанный инструмент предварительно очищают и обезжиривают. Процесс нанесения покрытия выполняют в последовательности: промывка в воде, обезжиривание в горячем растворе (75-90 °С) в течение 15-60 мин в зависимости от степени загрязнения инструмента, обработка в растворе, содержащем, г/л: едкого натра 10-15; кальцинированной соды 30-40; тринатрийфосфата 30-70; жидкого стекла 2-3; промывка в воде; декапирование в 5-10%-ном растворе соляной кислоты 0,5-2 мин; промывка в воде; кипячение в течение 25-30 мин в 100-150 г/л водном растворе ангидрида молибдена; промывку выполняют в горячей проточной, а затем в холодной проточной воде.

Глава 7
УПРОЧНЕНИЕ МЕТОДАМИ ФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ КОНЦЕНТРИРОВАННОЙ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИЕЙ

Упрочнение методами лазерного воздействия

Лазерная закалка, проводимая с помощью оптического квантового генератора (лазера), перспективна для изделий, долговечность которых лимитируется износостойкостью и сопротивлением усталости, особенно если закалка другими методами затруднена вследствие сложности конфигурации детали и возможности ее значительного коробления при нагревании до закалочных температур.

Поверхностное упрочнение лучом лазера характеризуется рядом особенностей, позволяющих обеспечить: упрочнение локальных (по глубине и площади) объемов материала обрабатываемых деталей в местах их изнашивания (твердость упрочняемых участков может превышать на 15-20% и более твердость, достигаемую после термической обработки существующими способами); локальное упрочнение поверхностей труднодоступных углублений или полостей, в которые луч лазера может быть введен с помощью несложных оптических устройств; "пятнистое" поверхностное упрочнение значительных площадей деталей; заданную микрошероховатость упрочненных поверхностей; определенные физико-механические, химические и другие свойства поверхностей обрабатываемых деталей легированием их различными элементами с помощью лазерного излучения; отсутствие деформаций обрабатываемых деталей благодаря локальности термической обработки, что позволяет полностью исключить необходимость дополнительного финишного шлифования; простоту автоматизации процесса обработки лучом лазера по контуру, в том числе деталей сложной формы, так как лазерный нагрев осуществляется бесконтактно.

Лазерную обработку применяют для повышения стойкости деталей штампов, пресс-форм, режущего инструмента и деталей, имеющих рабочие поверхности, доступные для обработки лучом лазера, в том числе с использованием оптических и управляющих систем. Поверхностной лазерной обработке подвергают инструмент, прошедший термическую обработку, окончательное шлифование и заточку.

Лазерному упрочнению подвергают стали: углеродистые, низкоуглеродистые, легированные (У8А, У10А, 45, ХВГ, 9ХС и др.), высоколегированные (ХГ2, Х12М, Х12Ф, ХВГ, ХШ15, Х, 5ХВ2С), низкоуглеродистые цементованные (20, 12ХН3А), хромистые коррозионно-стойкие (4Х13), быстрорежущие (Р18, Р12, Р5, Р6М5, Р9).

Метод основан на использовании явления высокоскоростного разогрева металла под действием энергии лазерного луча до температур, превышающих температуру фазовых превращений Ac_1, но ниже температуры плавления и последующего высокоскоростного охлаждения за счет отвода тепла с поверхности в основную массу металла. При обработке лазерным лучом, как и в случае обычной закалки, в стали образуются мартенсит и остаточный аустенит.

Твердость в зоне обработки повышается с 650-800 до 850-1100 HV, что обусловлено образованием в структуре более мелкозернистого мартенсита в результате быстрого нагрева и охлаждения. Глубина упрочненной зоны достигает 0,2 мм.

Лазерную обработку проводят в атмосфере воздуха или защитного газа (например, аргона). Шероховатость поверхности после лазерной закалки не изменяется. Средняя производительность термоупрочнения в аргоне до 500 мм^2/мин, на воздухе – до 800 мм^2/мин. Стойкость технологического инструмента увеличивается в 2 раза и более.

Критическими режимами лазерного упрочнения считаются те, при которых воздействие излучения оптического квантового генератора (лазера) не приводит к нарушению шероховатости поверхности, а глубина упрочненного слоя максимальна. При лазерном воздействии в режиме свободной генерации глубина упрочненного слоя

$$z \approx \sqrt{\alpha\tau},$$

где α – коэффициент температуропроводности; τ – длительность импульса лазерного воздействия.

С уменьшением τ уменьшается глубина z упрочненного слоя. Критическая энергия лазерной закалки снижается при уменьшении диаметра пятна закалки, что приводит и к некоторому сокращению глубины упрочненного слоя. В ряде случаев (например, при упрочнении вырубных пуансонов диаметром 2-3 мм) требуется проводить лазерное упрочнение при разных диаметрах пятен закалки. Значения критической плотности энергии E лазерного излучения, глубины z упрочненного слоя для сталей некоторых марок при разных диаметрах пятен закалки, а также микротвердость до и после упрочнения приведены в табл. 1.

Выбор критической энергии лазерного излучения при обработке с разным диаметром пятна закалки проводят следующим образом. При фиксированном диаметре пятна закалки выполняют лазерную термообработку поверхности исследуемых образцов при различной энергии излучения лазера. Количество энергии, превышение которого приводит к нарушению шероховатости поверхности, считается *критическим*. Лазерную закалку чаще всего проводят в среде аргона, предохраняющего от обезуглероживания поверхность зоны лазерного воздействия. Для получения равномерного по глубине упрочненного слоя перед обработкой лазером поверхности детали подвергают травлению реактивом, содержащим: хлорного железа 10 г, соляной кислоты 15 см^3, воды 15 см^3. Затем упроч-

1. Режимы лазерной закалки инструментальных сталей

Марка стали	*E*, Дж					z, мкм					HV 100 исходная	HV 100 после упрочнения
	При диаметре пятна закалки, мм											
	2	3	3,6	4	4,5	2	3	3,6	4,0	4,5		
У8	9	23	31	41	54	108	117	126	132	136	708	1070
ХВГ	8	22	30	39	51	103	114	121	127	131	734	976
9ХС	8	21	29	37	49	98	112	117	124	129	708	1023
Х12М	7,5	20	28	35	46	91	103	112	115	118	764	934
Р6М5	7	18	26	32	43	82	91	103	107	113	794	871

няемую деталь, имеющую ровный темно-серый цвет, устанавливают и фиксируют на столе механизма перемещения лазерной установки.

Оптимальное значение плотности энергии E, глубины z упрочненного слоя и микротвердости при лазерной закалке инструментальных сталей некоторых марок в воздушной и аргонной средах на установке "Квант-16" при площади пятна закалки 0,1 см^2 приведены в табл. 2.

Плотность падающей энергии при лазерной закалке на воздухе меньше, чем в среде аргона. Это связано с тем, что нагрев металлов лазерным излучением на воздухе приводит к меньшему отражению света в результате дополнительного поглощения энергии образующейся оксидной пленкой. Шероховатость поверхности после лазерной закалки в оптимальном режиме не ухудшается.

Лазерную закалку как окончательный вид обработки можно применять при изготовлении инструмента и деталей технологической оснастки для упрочнения их рабочих поверхностей в случае интенсивного изнашивания или имеющих протяженную кромку. Для лазерного упрочнения протяженных кромок инструмента и деталей технологической оснастки применяют способ 50%-ного перекрытия пятен закалки, которое определяют как отношение разности диаметра D и шага S обработки к диаметру зоны лазерного воздействия:

$$K_n = \frac{D-S}{D}.$$

Коэффициент перекрытия пятен закалки определяют как отношение шага S обработки к диаметру D зоны лазерного воздействия. Поперечное сечение зоны лазерного воздействия имеет форму сегмента. Глубина упрочненной зоны по диаметру пятна закалки изменяется от 0 до z_{max}.

При 50%-ном перекрытии пятен закалки глубина упрочненной зоны практически одинакова по всей длине упрочненного слоя. Дальнейшее увеличение коэффициента перекрытия пятен закалки нецелесообразно, так как уменьшается производительность обработки. Схема управления перемещением лазерного луча в пространстве при упрочняющей обработке приведена на рис. 33. Оптимальные режимы упрочнения типовых инструментальных сталей на установке "Квант-18" даны в табл. 3.

Лазерное упрочнение стеллита. Ответственные детали, работающие в условиях повышенных и высоких давлений, агрессивных сред, газов и паров,

2. Режимы лазерной закалки инструментальных сталей на установке "Квант-16"

Параметр режима	Закаливаемая сталь						
	У8	У10	9ХС	ХВГ	ШХ15	Х12	Х12М
$E_{арг}$, Дж/см^2	310	300	300	300	300	280	280
$E_{возд}$, Дж/см^2	200	190	190	190	190	180	180
$z_{арг}$, мкм	125	120	120	120	120	105	105
$z_{возд}$, мкм	135	130	130	130	130	115	115
Твердость поверхности после закалки (HV 100)	1030	1000	980	1000	980	960	960

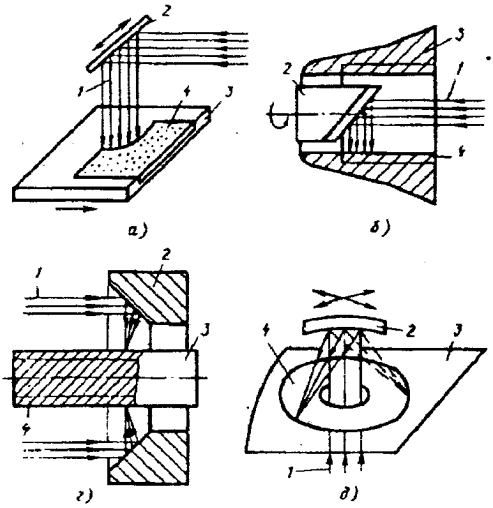


Рис. 33. Схемы управления перемещением лазерного луча в пространстве при обработке: *а* – плоскости; *б* – отверстия; *в* – внутреннего торца; *г* – наружного торца; *д* – криволинейной поверхности с центральным отверстием; 1 – световой поток; 2 – зеркало; 3 – деталь; 4 – зона упрочнения

отличающиеся малой площадью поверхности контакта, например клапаны, распределители, седла и другие детали трубопроводной арматуры из высокохромистых аустенитных сталей (например, 1Х17Н2, Х18Н10Т), наплавляют кобальтовыми стеллитами. Различие значений коэффициента линейного расширения исключает возможность применения обычных видов термообработки, основанных на резком изменении температур (например, закалки), для повышения твердости и контактной прочности наплавленного материала, определяющей выбор лазера в качестве источника импульсного локального термического воздействия на наплавленный материал для его упрочнения.

Наплавку стеллита ведут дуговым, кислородно-ацетиленовым или аргонодуговым методами. Наилучшее качество наплавленного стеллита достигается при аргонодуговой наплавке. Структура стеллита представляет собой твердый раствор на основе кобальта, расположенный на фоне эвтектики. Химический

3. Оптимальные режимы упрочнения инструментальных сталей на установке "Квант-18"

Сталь	Энергия излучения, Дж		Глубина упрочненного слоя, мм		Микротвердость HV 100	
	Обработка в среде					
	Воздуха *1	Аргона *2	Воздуха	Аргона	Исходная	Упрочненного слоя
45	106/71	104/72	160	140	560	890
У8	105/70	103/71	160	140	708	1023
ХВГ	100/67	98/67	150	130	730	976
Х12М	99/66	96/66	140	120	754	976
ШХ15	103/69	101/69	150	130	708	934

Размеры пятна контакта, мм:

*1 $D = 8$ – в числителе; 3×11 – в знаменателе;

*2 $D = 6$ – в числителе; 2×8 – в знаменателе

состав наплавленного стеллита, % (мас. доля): C 1,6-2,3; Si 1,5-2,5; Cr 26-32; Co 59-65; W 4-5; Fe – остальное. Наплавку стеллита проводят на детали, предварительно нагретые до 750-800 °С. Охлаждение наплавленных деталей выполняют медленно вместе с печью.

Предварительный подогрев и замедленное охлаждение вызваны разностью значений коэффициента линейного расширения наплавляемого металла и металла основы. Упрочненная зона шириной 0,6 мм образуется последовательными пятнами фокусирования лазерного облучения с перекрытием $0{,}75d$ (d – диаметр пятна), расположенными по контактной поверхности детали (например, по контактной окружности золотника трубопроводного клапана).

Оптимальные режимы лазерного упрочнения стеллита на установке типа СЛС-10-1: напряжение накачки Uн = 980 В, что соответствует энергии импульса E = 8 Дж, длительность импульса τ = 4 мс, число импульсов в фокальном пятне n = 1÷8, фокусное расстояние фокусирующей оптики F = 37 мм, смещение поверхности образца относительно фокальной плоскости ΔF = 0,05÷0,1, мм. При этих режимах обработки диаметр зоны проплавления составляет 0,4-0,6 мм. Лазерный нагрев приводит к повышению микротвердости на 210-240 HV по сравнению с исходной структурой и увеличению твердости материала до 49-50 HRC при исходной твердости 40 HRC.

Комплексное лазерное и криогенное упрочнение стали выполняют последовательным лазерным нагревом (закалкой) упрочняемой поверхности и последующим охлаждением всей детали в среде жидкого азота или иного криоагента, обеспечивающего охлаждение до температуры, более низкой, чем температура мартенситного превращения. При криогенной обработке уменьшается содержание аустенита в поверхностном слое, что приводит к повышению микротвердости поверхностного слоя и уменьшению его изнашивания по сравнению с изнашиванием поверхностей лазерной закалкой. При комплексном применении лазерной закалки и криогенной обработки не происходит растрескивания образцов после их извлечения из жидкого азота, а также в процессе испытаний. Таким образом, применение комплексной обработки обеспечивает значительное повышение стойкости инструмента как для обработки резанием, так и для обработки давлением.

Комплексную лазерную закалку и криогенную обработку выполняют по оптимальным режимам, приведенным ранее. Твердость некоторых инструментальных сталей после термообработки по обычной схеме (закалка – отпуск), а также после дополнительного упрочнения лазером или комплексной лазерно-криогенной обработки приведен в табл. 4.

Комплексное лазерное и ультразвуковое упрочнение выполняют локальным нагревом зоны упрочнения лазерным лучом и ее последующей или совмещенной ультразвуковой обработкой (скоростная деформация и охлаждение). Объединение методов позволяет получать высокие скорости местного нагрева (10^{10} °С/с), охлаждения (10^6-10^8 °С/с) и деформации ε = 1400 мм/с). Схема процесса показана на рис. 34.

Совместное действие температуры, давления и скоростного охлаждения приводит к возникновению мелкодисперсной структуры ("белого" слоя) в поверхностном слое металла, отличающейся высокой микротвердостью. Так, если твердость после ультразвуковой обработки достигнет 400-450 HV 100, а после лазерной – 700-800 HV 100, то после лазерной и последующей ультразвуковой она может оказаться равной 800-950 HV 100. Совмещение методов позволяет получить еще боль-

4. Микротвердость инструментальной стали после комплексного лазерно-криогенного упрочнения

Сталь	Микротвердость HV стали		
	исходная (после закалки и отпуска)	После лазерной закалки	После лазерной закалки и криогенной обработки
У12	734	976	1070
ХВГ	734	976	1119
Р6М5	834	934	1070

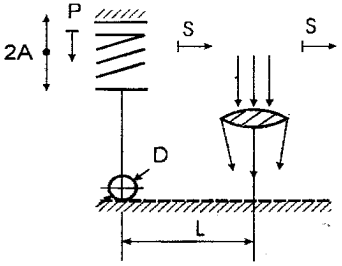


Рис. 34. Схема процесса комплексного лазерного и ультразвукового упрочнения

шую твердость 1200-1300 HV 100 при исходной твердости 250 HV 100.

Сочетание высокой энергии импульса и скоростной деформации приводит к снижению шероховатости поверхности. С уменьшением расстояния l (l = 1,6 мм) шероховатость поверхности снижается. Например, при исходной шероховатости Ra = 0,63 мкм значения шероховатости Ra равны, мкм: 2,5 после лазерной обработки (на указанных ниже режимах); 1 после лазерной и последующей ультразвуковой; 0,25 после совмещенной.

Комплексное лазерное и ультразвуковое упрочнение можно выполнить на следующих режимах: энергия импульса E = 5÷10 Дж; длительность импульса τ = 0,4÷7 мс; диаметр пятна закалки 2-3 мм; частота механических колебаний f = 20 кГц; статическая сила P = 10÷200 H; диаметр шара d = 5÷10 мм; подача S = 0,1 мм/дв. ход (0,1 мм/об); расстояние между центрами пятен контакта и закалки l = 1,6÷2,8 мм; скорость вращения (для тел вращения) v = 35÷55 м/мин; смещение инструмента $2A$ = 25÷30 мкм; толщина упрочненной зоны (с зоной термического влияния) до 0,25-0,3 мм.

Упрочнение методами воздействия магнитным полем

Инструмент и обрабатываемый материал, взаимодействуя в процессе резания, образуют термопару, состоящую из взаимно перемещающихся разнородных элементов, каждый из которых обладает специфическими физикомеханическими свойствами. В этих условиях разность температур, образующихся в зоне резания и вне ее, создает условия для возникновения электрического потенциала на разноименных концах инструмента и заготовки. Установлено, что появляющаяся термоЭДС оказывает влияние на процесс резания и эксплуатационную стойкость инструмента, особенно при обработке стали невысокой твердости, содержащей небольшое количество углерода и легирующих примесей.

Процессы, связанные с *возбуждением термоЭДС в зоне резания,* еще достаточно не изучены. Их проявления в общем виде сводятся к следующему.

В зоне резания возникает *эрозия металлов,* т. е. разрушение поверхностей детали и инструмента импульсами слабых электрических разрядов, подобно процессу, действующему в электроэрозионных станках для обработки металлов. В зависимости от полярности термических токов в цепи инструмент – станок –

заготовка эрозия в большей или меньшей степени разрушает лезвие и поверхность инструмента, создает множественные очаги концентрации напряжений и развития разрушений.

В зоне резания возникает *кавитация газов и паров,* вызывающая разрушение поверхности инструментов взрывами весьма малых парогазовых пузырьков, образующихся при испарении жидкостей и материалов, попавших в зону. Совокупные действия эрозии и кавитации усиливают разрушительное влияние эрозии, поскольку кавитационные вихри дополнительно выполняют роль рабочей жидкости в эрозионном процессе.

Под влиянием термоЭДС в зоне резания возникает *электромагнитная индукция,* характеризующаяся напряженностью магнитного поля. Поскольку термоЭДС обладает постоянной направленностью, то и индуцируемое ею магнитное поле также имеет постоянную полярность.

Магнитная и электрическая полярности зависят от сочетания свойств материалов инструмента и заготовки, влияния внешних магнитных, электрических и тепловых полей, действия ряда других факторов. Однако при любой полярности влияние магнитного поля приводит к накапливанию пылевидных микрочастиц металла в зоне резания, их намагничиванию и поляризации. Поляризованные частицы металла налипают на поверхности инструмента и заготовки, заряженные обратной полярностью, и действуют как абразивные микропорошки. Они создают в зоне резания эффект абразивного изнашивания и разрушения. Влияние этого эффекта распространяется на металл заготовки и инструмента. Его проявления на поверхности заготовки совпадают с целью процесса резания. Напротив, эффект налипания микрочастиц на лезвие инструмента приводит к увеличению силы трения и к абразивному изнашиванию его поверхности. В результате стойкость инструмента снижается.

Сочетание процессов эрозии, кавитации и абразивного изнашивания ухудшает условия отвода теплоты из зоны резания. Возникает дополнительное количество теплоты, увеличивающее разность температур на концах термопары инструмент – заготовка. Соответственно растет разность потенциалов и значение термоЭДС. Возрастает напряженность индуцированного ею магнитного поля. Усиливаются условия для появления и действия эрозии, кавитации и абразивного налипания. Возрастает сила их совокупного действия на контактируемые поверхности. Таким образом, явления, возникающие в зоне резания в результате влияния магнитного поля, вызывают рост напряженности этого поля, что, в свою очередь, усиливает разрушительную силу описанных выше процессов. Следовательно, эффект разрушения лезвия инструмента под действием индуцированного магнитного поля постоянно и лавинообразно усиливается, достигая максимального значения, при котором инструмент выходит из строя. Подобные явления возникают не только в паре инструмент – заготовка, но и в любой трущейся паре металлических деталей, оказывая значительное влияние на скорость и характер протекания процессов разрушения поверхностей.

Защиту металлических поверхностей от действия термоЭДС выполняют, чаще всего используя методы разрыва цепи термопары или компенсации термоЭДС. Последний сводится к тому, что в зону контакта инструмента с деталью от постороннего источника тока вводят электродвижущую силу, полярность которой противоположна, а величина равна, соответственно, полярности и величине термоЭДС, возникающей в зоне резания.

Разрыв цепи термопары осуществляют *электроизоляцией инструмента или одной из трущихся поверхностей.* Электроизоляцию наносят покрытием, напылением или окунанием непосредственно на изолируемую поверхность. При возможно малой толщине слоя покрытие должно обеспечить сохранение жесткости системы станок – приспособление – инструмент – деталь и высокое сопротивление прохождению малых электрических токов. Сопротивление изолирующего слоя должно быть не менее 3 МОм, прочность на сдвиг – не менее 20 МПа.

Слой должен быть долговечным и не хрупким. В наибольшей степени этим требованиям отвечают эпоксидные клеи К-153, фенольно-каучуковый клей ВК-32-200 и герметик (эластомер) ГЭН-150, представляющий собой продукт смешивания нитрильного каучука СКН-40 со смолой типа ВДУ. Можно использовать фенольно-каучуковые клеи ВК-3 и ВК-4, фенольно-поливинилацеталевый клей БФ-2, полиуретановый лак горячего отверждения УЛ-1, бакелитовый лак или шеллак. Лучшими качествами для указанных целей обладает герметик ГЭН-150. В зависимости от конструкции и формы поверхности, а также требуемой точности ее обработки толщина покрытия должна составлять 20-80 мкм.

Наилучшие результаты при нанесении покрытий достигают при окунании изделий в ванну. Изолируемую поверхность перед окунанием или напылением следует очистить от забоин, заусенцев, следов коррозии и остатков прежнего электроизоляционного покрытия, а также тщательно обезжирить и высушить. Места, не требующие покрытия, смачивают любым маслом или пластичным смазочным материалом либо заклеивают бумагой. Для получения равномерного слоя покрытия инструмент или деталь следует медленно вращать, а плоскую поверхность перемещать возвратно-поступательно.

Для сушки покрытия инструмент или деталь нужно подвесить. После полного отверждения (полимеризации) слоя на него наносят следующий слой до получения нужной толщины покрытия.

Электроизоляцию можно осуществить также и с помощью переходных установочных элементов – втулок, подкладок, призм и т. п., изготовленных из электроизоляционного материала. Такие элементы, выполненные с достаточной точностью, способствуют увеличению точности обработки инструментом или сопряжения деталей.

Для эффективного разрыва цепи термоЭДС инструменты или шпиндели станков или инструментальные оправки изготовляют *клеесборными,* используя для этих целей клеи, перечисленные выше. Однако все виды механической защиты напылением, смачиванием или использованием установочных и клеесборных элементов обладают общими существенными недостатками – они недолговечны, не обеспечивают требуемой точности сопряжения и достаточно трудоемки в изготовлении. Использование установочных элементов, кроме того, связано с необходимостью изготовления большой номенклатуры типоразмеров этих элементов, что требует организации их производства, учета, хранения, реставрации и т. п.

Процесс компенсации термоЭДС можно упростить [а. с. 742037 (СССР)]. Предварительно размагниченный режущий инструмент или деталь намагничивают так, чтобы полярность электродвижущей силы электромагнитной индукции, возникающей при относительном перемещении намагниченного инструмента и обрабатываемой детали, была противоположна полярности возникающей термоЭДС, а значение остаточной магнитной индукции выбирают из условия возможного равенства ЭДС индукции и термоЭДС.

Способ основан на явлении возникновения электродвижущей силы индукции при перемещении электропроводящих тел в магнитном поле. В частности, при вращении намагниченного инструмента возникает ЭДС униполярной индукции, а при вращении детали в магнитном поле инструмента – ЭДС электромагнитной индукции, которая может быть рассчитана по формуле

$$U = \frac{\omega R^2}{2} Bd,$$

где U – ЭДС индукции, В; ω – угловая скорость инструмента или детали, рад/с; R – радиус инструмента или детали, м; Bd – остаточная магнитная индукция инструмента, Т.

Исходя из значения термоЭДС, режима обработки резанием и размера инструмента, остаточную индукцию, необходимую для компенсации термоЭДС, рассчитывают по формуле

$$Bd = \frac{2E}{\omega R^2},$$

где E – термоЭДС, В; R – радиус инструмента или детали, м.

Используя зависимость $Bd = f(H)$ для конкретного инструмента, по рассчитанному значению остаточной индукции определяют напряженность H необходимого намагничивающего поля. Расчетные значения напряженности намагничивающего поля следует экспериментально проверять сравнением стойкости инструментов-образцов, обработанных при различных полярности поля и времени выдержки.

При обработке углеродистой стали *намагниченными быстрорежущими резцами* лучшие результаты достигаются инструментами, режущая кромка которых является северным полюсом магнита. Увеличение тока намагничивания, а следовательно, степени намагниченности до предела магнитного насыщения, приводит к возрастанию стойкости резцов. Влияние намагничивания на изнашивание резцов особенно заметно при работе с малыми значениями подачи (до 0,14 мм/об) и скорости резания до 15 м/мин.

Намагничивающей обработке подвергают стальные режущие инструменты: резцы, сверла, развертки, метчики, плашки и др., а также ножи, матрицы и пуансоны разделительных штампов для холодной штамповки.

Упрочнение сталей с применением магнитного поля и высокоскоростного трения

Методика предложена и разработана проф. В.Д. Евдокимовым и доц. Л.В. Кошарской.

При разработке методики была выбрана схема с одним вращающимся диском, что упрощало проведение исследований и создание экспериментальной установки, хотя заранее исключало возникновение знакопеременных сдвиговых деформаций образцов. Применялись высокие скорости скольжения в диапазоне

70...100 м/с. При этом особый интерес представляли режимы высокоскоростного трения, при которых в поверхностных слоях сталей возникают белые слои.

Рабочий узел созданной установки показан на рис. 35.

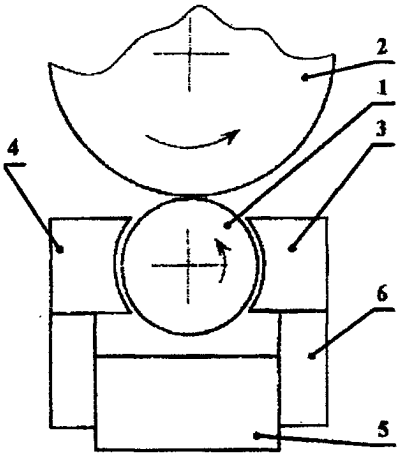


Рис. 35. Схема рабочего узла трибомагнитной установки: 1 – образец; 2 – фрикционный диск; 3, 4 – полюса электромагнита; 5 – обмотка; 6 – магнитопровод

Видно, что к вращающемуся цилиндрическому образцу 1 прижимается фрикционный диск 2, который обеспечивает скорость скольжения 100 м/с. При этом образец 1 вращается с небольшой скоростью 0,2 м/с. Скорость вращения образца и диска можно регулировать. Так, вращение образца 1 осуществляется через коробку скоростей токарного станка или в случае применения лабораторного стенда от электродвигателя постоянного тока – через червячный редуктор. Вращение фрикционного диска 2 достигалось с помощью электродвигателя (7,8 Квт, 2800 об/мин.) и двухступенчатую клиноременную передачу. Диаметр диска составлял 350 мм, который выполнялся из инструментальной стали У10.

Была разработана схема, которая показана на рис. 35. Из этого рисунка видно, что электромагнитное поле создавалось посредством электромагнита 5 и двух башмаков 3, 4, охватывающих цилиндрическую поверхность образца с определенным зазором. По этой схеме силовое магнитное поле пронизывало поверхность трения образца 1 вне зоны фрикционного контакта, когда деформированные микрообъемы подвергались воздействию магнитного поля спустя короткое время после выхода из зоны контакта или, наоборот, перед входом в зону контакта. Полюса электромагнита имели два подвижных башмака 3, 4, передвижением которых изменялся зазор между поверхностью вращающейся цилиндрической детали 1 и этими башмаками. Было уделено внимание не только зазору между деталями 1 и 3, 4, но и форме поверхностей детали 3,4, обращенных к образцу.

Применение такой комбинированной методики упрочнения повышает износостойкость образцов трения в 1,5 раза и более и совершается в течение 30 с при условии, что для получения максимального эффекта необходим предварительный выбор рациональных режимов с обязательным получением в поверхностных слоях деталей сплошных белых слоёв.

Упрочнение методами наплавки и напыления легирующими металлами

Наплавку или напыление легирующими металлами выполняют для увеличения износостойкости, жаропрочности и эксплуатационной стойкости поверхностей деталей, работающих в условиях больших знакопеременных нагрузок, высоких температур и давлений, в абразивных и агрессивных средах, а также в целях замены дефицитных и дорогостоящих металлов.

Углеродистые стали с содержанием углерода до 0,3-0,4% (мас. доля) применяют для наплавки деталей, подвергающихся незначительным абразивным воздействиям и усталостному износу в условиях трения скольжения и качения при работе в неагрессивных средах (валы, цапфы, ходовые колеса, опорные катки, ножи и т. п.).

Углеродистые и низколегированные стали с содержанием углерода более 0,4% (мас. доля), а также стали, дополнительно легированные никелем, хромом, ниобием, вольфрамом, и другие используют для наплавки деталей, работающих в условиях интенсивных абразивных и абразивно-ударных воздействий в малоактивных коррозионных средах (ножи рубительных машин, гарнитуры размольных мельниц, бронзовые муфты и др.).

Хромистые стали, характеризующиеся высокой прочностью и коррозионной стойкостью в ряде агрессивных сред, применяют для наплавки деталей, подвергающихся коррозионно-металлическому, коррозионно-абразивному, газо- и гидроабразивному, а также кавитационному изнашиванию.

Хромоникелевыми аустенитными сталями с высокой стойкостью против коррозии и низкой твердостью наплавляют детали, работающие в агрессивных средах при небольших механических воздействиях (плунжеры, корпуса и крыльчатки насосов для перекачки жидкостей, не содержащих абразивных частиц, детали запорной и регулирующей арматуры и т. п.).

Наплавку деталей, подвергающихся кавитационному абразивному изнашиванию в агрессивных средах, особенно в окислительных, выполняют высокохромистыми чугунами.

На особо ответственные детали наплавляют никелевые и кобальтовые сплавы. Они хорошо противостоит изнашиванию в агрессиных средах даже при наличии абразивных воздействий.

Наплавку производят *сплошными проволочными* или *ленточными электродами,* покрытыми обмазкой, либо в сварочную ванну дополнительно вводят специальные флюсы. Составы обмазок и флюсов содержат в себе легирующие примеси, количество которых регулируется в зависимости от требуемого состава и свойств наплавленного слоя металла.

Наплавочные электроды могут быть спечены из металлических порошков и иметь форму проволоки, ленты или трубчатой проволоки. Металл, наплавленный порошковыми *спеченными электродами,* более однороден, что объясняется более равномерным распределением легирующих элементов в объеме электродов.

Детали, подлежащие наплавке, тщательно очищают от грязи, масла, продуктов коррозии и краски. Если технологическим процессом наплавки предусмотрен предварительный подогрев, то экономически целесообразно сочетать с ним очистительный отжиг, обеспечивающий быстрое выгорание масла не только с поверхности детали, но и из пор, раковин и трещин. После отжига оксиды, образо-

вавшиеся на поверхности детали, удаляют металлической щеткой. Металл наплавляют на очищенную поверхность. Канавки, пазы и отверстия на поверхности, которые необходимо сохранить, заделывают медными, графитовыми или угольными вставками. Ненаплавляемые поверхности закрывают сухим или мокрым асбестом. На ненаплавляемых переходных поверхностях и кромках делают фаски или канавки шириной не более 15-16 мм и глубиной не более 6-8 мм (рис. 36).

Детали из легированных конструкционных сталей, содержащих не более 0,3% углерода, перед наплавкой подогревают. Для небольших деталей достаточно подогреть только участок начала наплавки до температуры, устанавливаемой в зависимости от марок стали и электродов. Штампы для холодной листовой штамповки, холодной и горячей обрезки, наплавляемые электродами ЭН-60М, подогревают до 300-400 °С; молотовые и высадочные формообразующие штампы до 400-500 °С; прошивные, калибровочные пуансоны, матрицы прессования, наплавляемые электродами ОЗН-1, ОЗН-3, до 400-500 °С, а наплавляемые электродами УОНИ-13/85 до 300-400 °С. Все закаленные детали перед наплавкой необходимо подогревать. Чугунные детали наплавляют без подогрева.

Предварительный подогрев деталей проводят в печах или на установках ТВЧ в индукторах. Допускается местный подогрев газопламенными горелками. Рекомендации по предварительному нагреву наплавляемых деталей приведены далее.

Наплавку необходимо выполнять непрерывно, так, чтобы температура подогрева деталей не снижалась более чем на 100 °С. При необходимости допускается повторный общий или местный подогрев. Отдельные валики наплавляют рассредоточенно обратноступенчатым способом, или "горкой". Толщина многослойной наплавки может быть 3-12 мм. Число слоев зависит от марки применяемых электродов и равняется: 1-3 для ОЗН-1 или ОЗН-3; 1-5 для ОЗШ-1; 2-5 для ЭН-60М. Наплавку больших объемов металла проводят ванным способом на постоянных режимах тока с применением медных и графитовых форм (рис. 37), в результате чего значительно повышается качество наплавки, увеличивается ее производительность и уменьшается коробление детали.

При многослойной наплавке наиболее ответственных мест в штампах (особенно молотовых) отдельные наплавленные валики проковывают сразу после наплавки в горячем (по возможности пластическом) состоянии ручным пневматическим молотом. При послойной наплавке отдельные валики тщательно очищают от шлака и брызг. Наплавку ведут на постоянном токе обратной поляр-

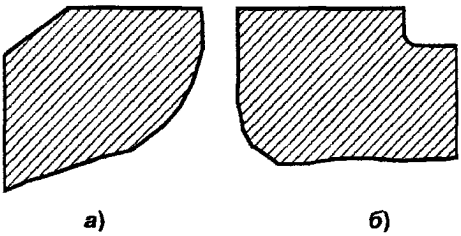


Рис. 36. Форма разделки фасок под наплавку:
а – открытая; б – закрытая

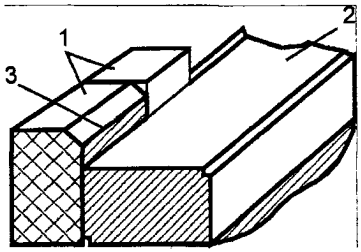


Рис. 37. Формы, применяемые при наплавке ванным способом:
1 – графитовые разборные формы;
2 – наплавляемая деталь;
3 – наплавленный металл

ности короткой дугой и с неглубоким проплавлением в нижнем и вертикальном положениях.

Чугунные детали наплавляют рассредоточенно, медленно, не допуская перегрева. Многослойные наплавки (более трех слоев) для чугуна не рекомендуются. Лучшее качество наплавки получают при ширине валика, равной 2,5 диаметра электрода. Валики накладывают так, чтобы каждый последующий перекрывал предыдущий на 1/2-1/3 его ширины. Припуск на механическую обработку после наплавки должен составлять 2-3 мм. Необходимо следить, чтобы впадины между валиками находились выше линии обработки поверхности после наплавки.

Соотношения между толщиной слоя наплавляемой стали, диаметром электрода, числом слоев и силой тока приведены в табл. 5; режимы автоматической наплавки под флюсом – в табл. 6 и 7; режимы электрошлаковой наплавки проволочными электродами – в табл. 8.

Силу тока при ручной дуговой наплавке определяют по формуле $I = kd_{эл}$, где I – сила тока наплавки, А; k – коэффициент, равный 35-40; $d_{эл}$ – диаметр электрода, мм.

Наплавленные детали, которые будут обрабатывать абразивами, сразу после наплавки подвергают отпуску в течение 1-2 ч для снятия внутренних напряжений.

5. Режимы наплавки стали в зависимости от толщины наплавляемого слоя

Толщина наплавляемого слоя, мм	Диаметр электрода, мм	Число наплавляемых слоев	Сила тока, А
До 1,5	3	4	80-100
» 5	4-5	1-2	130-180
Св. 5	5-6	2 и более	180-240

6. Режимы автоматической наплавки под флюсом в зависимости от марки наплавляемой стали

Сталь	Проволока		Флюс	Сила тока, А
	Марка	Диаметр, мм		
30ХГСА	Св-18 ХГСА	2,0-4,0	АН-348А	300-320
3Х2В8	ПП-2Х3В10ГТ	2,5-2,6	АН-348А	До 220
4ХНВ	ПП-3Х2В8	3,2-3,6	АН-20	240-260
4ХНВ	ПП-5Х4В3Ф	2,5-2,6	АН-200	280-300
3Х2НВ				

Сталь	Напряжение, В	Скорость	Скорость подачи электродной проволоки	Шаг	Вылет электрода
		м/ч		мм	
30ХГСА	27-29	35	153	5-6	25-30
3Х2В8	До 28	19-22	77-90	4-5	До 20
4ХНВ	26-28	30	156	5-6	20-25
3Х2НВ	28-30	25	77	3	20-25

7. Режимы автоматической наплавки стали под флюсом в зависимости от толщины наплавляемого слоя

Толщина наплавляемого слоя	Диаметр электрода	Сила тока, А	Скорость		Напряжение на дуге, В
			Подачи электродной проволоки	Наплавки	
мм			м/ч		
2-3	2	160-220	101-12	20-25	30-32
3-4	2	340-350	191	25	32-34
4-5	3	360-460	91,5	20-25	32-34
5-6	5	650-700	191-256	24-30	34-36

8. Режимы электрошлаковой наплавки стали проволочными электродами в зависимости от толщины наплавляемой детали

Толщина наплавляемой детали, мм	Сила тока на один электрод, А	Напряжение в ванне, В	Число электродов	Диаметр электрода	Расстояние между электродами	Скорость поперечного движения электродов, м/ч
				мм		
30	350-370	32-34	1	2,5	-	-
70	650	47	1	2,5	-	31
100	600-610	42-16	2	2,5	45-50	26-32
150	450-500	44-50	2	3	65	26-31
200	550	46-18	2	3	90	36
250	500-350	50-55	2	3	125	31
300	400-150	46-48	3	3	110	31-36
350	400-150	46-48	3	3	110	31-36
450	200	26-28	9	3	50	-

Толщина наплавляемой детали, мм	Скорость подачи электрода	Скорость наплавки	Время выдержки у ползунов, с	Зазор	Глубина шлаковой ванны	Сухой вылет
	м/ч			мм		
30	172	0,9-1,0	-	30	20-25	40-45
70	371-100	1,0-1,0	5	26-30	60-65	90-95
100	300	1,6	4-6	24-27	50-70	60-80
150	320-240	0,8-0,9	5	25-28	40-50	60-70
200	250	0,5	5	32	50	60-70
250	230-250	0,4-0,5	5	28-32	45-50	60-70
300	200-220	0,35	5	30	45-50	60-70
350	200-220	0,30	5	30-33	45-50	60-70
450	60-80	0,60	5	30 - 33	40-45	50-70

Детали, рабочие кромки и поверхности которых необходимо обработать режущим инструментом, после наплавки отжигают, а после обработки резанием – закаливают и отпускают по режимам, соответствующим составу наплавленного металла.

При ручной дуговой наплавке плавящимся электродом его диаметр и режим наплавки зависят от толщины металла, подлежащей наплавке, размеров детали, требований к качеству и внешнему виду и др. (табл. 9).

Примеры режимов наплавки порошкообразных смесей приведены в табл. 10; аргонодуговой наплавки – в табл. 11.

9. Режимы ручной дуговой наплавки в зависимости от толщины наплавляемой детали

Толщина детали	Диаметр электрода	Сила тока, А
мм		
1-2 3-5 4-10	2-3 3-4 4-5	80-100 100-160 140-200
12-24 30-60	6-7	180-300

Примечание. Наплавку можно выполнять постоянным или переменным током.

10. Режимы наплавки порошкообразных смесей угольными и графитовыми электродами (постоянный ток, прямая полярность)

Электрод	Диаметр электрода, мм	Сила тока, А	Напряжение дуги, В
Угольный	10 12	160-200 200-300	24-26
	14 16	300-350 350-400	25-28
	20	400-500	26-30
Графитовый	6 8 10	120-160 200-250 250-300	26 25 26

Примечание. Наплавка выполняется постоянным током прямой полярности.

11. Режимы ручной аргонодуговой наплавки

Диаметр присадочной проволоки, мм	Род тока	Сила тока, А	Скорость, м/ч	Расход аргона, л/мин
1,6	Переменный	35-75	9-20	3-4
1,6-2		45-85		4
1,6	Постоянный прямой полярности	30-60	7-17	3-4
1,6-2		40-75	5,5-12	4
1,6	Переменный	40-60	6-8	3-4
			4-5,5	4

Глубину проплавления можно определить по формуле

$$h = k\sqrt[3]{\frac{I^4}{v_н U^2}},$$

где h – глубина проплавления, мм; k – коэффициент; I – сила тока, А; $v_н$ – скорость наплавки, мм/мин; U – напряжение, В.

Автоматическую наплавку низкоуглеродистых и низколегированных сталей ведут проволокой из низкоуглеродистых (Св-08, Св-08А), марганцовистых (Св-08Г, Св-08ГА) и кремниймарганцовистых (Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-12ГС) сталей.

Стали с большим содержанием углерода наплавляют проволокой Нп-65Г, Нп-80, Нп-30ХГСА, Нп-40Х13 (ГОСТ 10543-82). Химический состав и твердость наплавленного металла приведены в табл. 12 и 13.

12. Сварочная и наплавочная проволоки для автоматической наплавки деталей

Марка проволоки	Содержание компонентов, % (мас. доля)					Твердость HRC после наплавки
	C	Mn	Si	Cr	Ni	
Св-08	0,1	0,35-0,60	0,03	0,15	0,3	16-43
Св-08А	0,1	0,35-0,6	0,03	0,12	0,25	18-41
СВ-10Г2	0,12	1,5-1,9	0,06	0,2	0,3	21
СВ-08ГС	0,1	1,4-1,7	0,6-0,85		0,25	20
СВ-08Г2С	0,11	1,8-2,1	0,7-0,95			20-45
СВ-12ГС	0,14	0,8-1,1	0,6-0,9		0,3	22
СВ-18ХГС	0,22		0,9-1,2	0,8-1,1		28
Нп-30	0,27-0,35	0,5-1,2	0,17-0,37	0,25	0,3	16-22
Нп-40	0,35-0,45					17-23
Нп-50	0,45-0,55					18-24
Нп-65	0,6-0,7					22-30
Нп-80	0,75-0,85					30-34
Нп-65Г	0,6-0,7	0,9-1,2		0,3		25-32
Нп-30ХГСА	0,27-0,35	0,8-1,1	0,9-1,2	0,8-1,1	0,4	30-34
НП-40Х2Г2М	0,35-0,43	1,8-2,3	0,4-0,7	1,8-2,3	0,4	35-40
Нп-50ХФА	0,46-0,54	0,5-0,8	0,17-0,37	0,8-0,93		37-45
Нп-Х20Н80Т	До 0,12	0,7	0,8	19-23	Основа	18-22
Нп-40Х13	0,35-0,45	0,8	0,8	10-12	0,6	40-45

Примечание. В проволоке марок Нп-40Х2Г2М и Нп-50ХФА содержится, соответственно, 0,8-1,2 и 0,1-0,2% (мас. доля) Mo.

13. Порошковая проволока и лента для автоматической наплавки

Марка проволоки или ленты	Тип наплавляемой стали	Содержание компонентов, % (мас. доля)								Твердость HRC после наплавки
		C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Ti	
ПП-3Х2В8	3Х2В8	0,32	0,6	0,8	2,5	-	8,5	0,3	-	45-53,2
ПП-АН122	30Х5Г2МО	0,3	0,8	1,6	4,5	0,6	-	-	0,25	51-57
ПП-АН128	35Х4Г2СМ	0,35	0,7	2	4,1	0,9	-	-	0,35	49-55
ПП-АН121	20ХГТ	0,18	0,6	1	0,8	-	-	0,15	0,25	30-37
ПП-АН120	20Х2Г2М	0,18	0,6	1,8	1,8	0,7	-	-	-	37-42
ПП-АН105	Г13Н4	1	0,5	13	(Ni-4,2)	-	-	-	-	22-27
ПП-АН130	25Х5ФМС	0,25	1,2	0,6	5	1,2	-	0,4	-	42-47
ПП-3Х4В3Ф	3Х4В3Ф	0,25	0,6	0,6	4,1	-	3,5	0,6	0,2	34-43,5
ПП-АН104	У20Х12ВФ	1,8	0,6	0,6	12	-	1	0,25	-	42-46
ПП-АН103	У20Х12М	1,8	0,6	0,6	12	0,8	-	-	-	42-46
ПП-АН106	10Х14Т	0,1	0,4	0,6	14	-	-	-	0,12	44-50
ПП-АН125	20Х15СТРТ	2	1,5	1	15	(B-0,7)	-	-	0,3	52-59
ПП-АН250	15СТ	0,14	0,8	0,4	-	-	-	-	0,4	23-28
ПП-АН138	10Х15Т	0,1	2,0	0,8	15	-	-	-	0,2	26-28
ПП-АН126	20Х2М2СТ	0,2	1	2	2	-	-	-	0,7	37-42
ПП-АН150	10Х17С5М2	0,09	5,5	2	17,8	-	-	-	0,14	30-36
ПП-АН1 (АН3)	10Х17С5М2	0,08-0,09	0,22	0,78	-	-	-	-	-	256-197 НВ
ЛС-70Х3НМ	70Х3ГСНМ	0,9-1,1	0,8	0,9	3	0,6	-	-	-	54-60
ПП-АН171	100Х20Р4С3Г2	1	3	2	4,2-48	0,8-1,1	0,9-1,2	-	-	53-59
ЛС-У10Х7ГР	100Х7ГР	1,1-1,4	1,3	0,8	7-8	0,8-0,9	-	-	-	58-60
ЛС-1Х14Н3	12Х14Н3	0,2-0,4	0,5	0,04	16-18		3,5-4,5	-	-	48-50
ЛС-5Х4В3ФС	5Х4В3ФС	0,5	0,8	0,7	4	-	3	0,7	-	44-48
ЛС-25Х5ФМС	-	0,2	0,8	0,9	5	1	-	0,5	-	42-46
ЛС-5Х4В2М2ФС	-	0,5	0,8	0,9	4	2	2	0,7	-	50-54
ЛС-12Х14Н3	-	0,1	0,8	0,7	14	-	-	-	-	42-46
ЛС-18ХГСА	18ХГСА	0,2	0,8	0,7	1,2	-	-	-	-	30-34

Флюсы подразделяют на плавленые, керамические и флюсы-смеси. Плавленые флюсы АН-348А, АН-60, ОСУ-45, АН-20 и АН-28 содержат стабилизирующие и шлакообразующие элементы. В состав этих флюсов не входят легирующие добавки.

Керамические флюсы АНК-18, АНК-19 и ЖСН-1, кроме стабилизирующих и шлакообразующих элементов, содержат легирующие добавки – *ферросплавы.* При наплавке малоуглеродистой проволокой они обеспечивают высокую твердость и износостойкость наплавленного металла.

Флюсы-смеси состоят из флюса АН-348А с добавлением феррохрома, ферромарганца и графита. Смесь расстилают на листе слоем 15-20 мм и сушат 15-25 мин при температуре 100-120 °С. Затем просеивают через сито № 16 и сушат при температуре 150-200 °С в течение 3-4 ч. Твердость наплавленного металла зависит от содержания легирующих присадок (феррохрома и др.) в составе флюса (табл. 14). Режимы наплавки электродной проволокой на сварочных автоматах приведены в табл. 15.

При наплавке открытой дугой порошковыми проволоками типа ПП-АН122 и ПП-АН128 можно увеличить силу тока (т. е. производительность процесса) в 2 раза и более. Отпадает операция отделения шлаковой корки от детали после наплавки. Микроструктура металла при наплавке на сталь 45 троосститно-мартенситная, твердость 51,5-57 $HRC_э$. Износостойкость в 1,6-2 раза больше, чем у стали 45, закаленной токами высокой частоты (ТВЧ).

14. Твердость наплавленного металла в зависимости от содержания феррохрома во флюсе

Содержание, % (мас. доля)		HRC наплавленного металла
Феррохрома во флюсе	Хрома в наплавленном металле	
5	2	41,5
10	4	49,5
15	6	56
25	10	49,5
20	8	53,5

Примечание. Наплавка осуществляется проволокой НП-60.

15. Режимы автоматической наплавки деталей электродной проволокой

Диаметр		Смещение в зените	Шаг наплавки	Сила тока, А	Скорость м/с	
Детали	Электродной проволоки				Подачи электродной проволоки	Наплавки
мм						
50-60	1,6	2-4	3	140-150	75-80	16-24
61-75	1,6	3-4	3,5	170-180	110-115	15-28
76-100	2	5-7	4,5	180-200	125-130	16-32
101-200	2-3	8-10	5,6	220-250	160-170	16-32
201-300	2-3	10-15	6,7	250-280	180-190	16-36

Широкое применение для наплавки получили *металло-керамические ленты* ЛМ-70Х3НМ, ЛМ-20Х10Г10Т, ЛМ-1Х14НЗ, ЛМ-5Х4В3ФС, разработанные в институте электросварки им. Е.О. Патона.

Наплавка металлокерамическими лентами осуществляется на постоянном токе обратной полярности. Плотность тока на электроде 10-20 А/мм^2, напряжение дуги 28-32 В, скорость наплавки 0,16-0,55 см/с. Скорость подачи ленты зависит от режимов наплавки и составляет 15-150 м/ч.

Режимы автоматической наплавки деталей порошковыми проволоками приведены в табл. 16, порошковыми лентами – в табл. 17, металлокерамическими лентами – в табл. 18. Наплавку порошковой проволокой и лентой выполняют постоянным током обратной полярности.

Биметаллические штампы холодной штамповки, *изготовленные с применением наплавки,* обладают рядом преимуществ. Оптимальной является конструкция штампов, у которых корпус изготовлен из вязкой и прочной низколегированной или углеродистой стали, а на рабочую поверхность наплавлен слой износостойкого материала. Повышается стойкость штампов, появляется возможность их многократного восстановления.

Технология изготовления штампа с применением наплавки предусматривает: изготовление корпусов матрицы и пуансона из низколегированной или углеродистой стали; разделку рабочей кромки под наплавку по всему периметру 8 × 8 мм (10 × 10 мм) или 10 мм × 45°; предварительный подогрев упрочняемой детали до 400 °С; наплавку режущих кромок проволокой ПП-АН140.

Режим наплавки проволокой диаметром 2,8 мм следующий: $I = 220 \div 260$ А, $U = 22 \div 24$ В, полярность тока обратная. Наплавку проводят не менее чем в два

16. Режимы автоматической наплавки деталей порошковой проволокой

Марка проволоки	Диаметр, мм		Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость наплавки, м/с
	Детали	Проволоки			
ПП-АН1	40-60	2,8	260-320	22-24	18-25
ПП-АН4	35-40 45-56 50-60	2,0 2,2 2,5	160-190 180-220 200-250	18-20 20-22 22-24	20-30 20-25 20-28
ПП-АН8	35-45 40-5 50-65 60-75	2,0 2,2 2,5 3,0	160-190 180-220 200-250 280-320	18-20 20-22 22-24 26-28	20-28 21-28 22-23 28-32
ПП-АН106	45-55 55-65 60-75	2,6	160-180 160-180 200-220	22-24 22-24 24-26	25-35 20-25 15-20
ПП-25Х5ФМС	45-55 50-65 60-75 60-80	2,6 3,6 3,6 3,2	160-180 200-220 240-270 400-420	22-24 22-24 24-26 28-32	35-40 30-40 25-35 28-32
ПП-АН125	30-40 40-50 50-60	2,6	120-130 170-130 160-180	19-20 19-20 20-21	30-35 28-30 28-30
ПП-АН122	60-70 70-80 80-100		170-220 220-240 280-300	20-21 22-23 24-26	24-28 23-26 22-26

17. Режимы автоматической наплавки деталей порошковыми лентами

Марка порошковой ленты	Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость наплавки, м/ч	Способ наплавки
ПЛ-17 (10Х20С3Р4)	700-1000	28-36	15-30	Под флюсом АН-200
		28-34	20-50	Открытой дугой
ПЛ-126 (20Х2Р2М)	600-1000	28-36	15-40	Под флюсом ПН-348А
		28-32	45-60	Открытой дугой
ОЛ-101 (У30Х25Н3С3)	700-750	32-34	17-23	Под флюсом АН-200
		28-30	40-45	Открытой дугой

слоя. Отпуск при 300-400 °С в течение 1 ч с последующим замедленным охлаждением. Структура наплавляемого металла – мартенсит и карбиды с умеренным количеством остаточного аустенита.

Ремонт изношенных рабочих элементов штампов для холодной штамповки и вырубных штампов при наличии сколов, трещин, выкрашиваний и других дефектов можно осуществить с помощью наплавки их поверхностей порошковой проволокой марки ПП-АН148 по следующей технологии: зачистка дефектного

18. Режимы автоматической наплавки металлокерамическими лентами

Размеры ленты, мм		Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость наплавки, см/с
Ширина	Толщина			
30	0,8-1,2	300-600	28-32	0,16-0,55
45		450-900		
60		600-1200		
75		750-1500		
90		900-1800		

участка; предварительный подогрев до 300 °С с целью предотвращения возникновения трещин в наплавленном слое; наплавка дефектного участка проволокой ПП-АН148 при режимах наплавки: $I = 20 \div 40$ А в зависимости от объема наплавки; U не превышает 40 В; полярность прямая; отпуск при 300 °С в течение 1 ч; шлифовка или электроэрозионная обработка наплавленного участка.

Технология обеспечивает получение наплавляемого металла типа 80Х12Н4ФЗМ2В2НР с твердостью 58-60 HRC уже в первом слое металла наплавки. Структура наплавляемого металла – мартенсит с умеренным количеством остаточного аустенита. Упрочняющая фаза – карбиды и бориды хрома, вольфрама и молибдена, а также интерметаллиды Fe-Co-Mo и Fe-W-Mo. Структура обеспечивает сочетание высокой твердости с удовлетворительной ударной вязкостью (до 14 Дж/см^2).

Автоматическая наплавка поверхностей может быть выполнена в среде углекислого газа, что не требует применения флюсов. При таком способе наплавки отсутствуют вредные выделения и шлаковые корки. Открытая дуга дает возможность наблюдать и корректировать процесс, проводить наплавку при любом пространственном положении наплавляемой плоскости, механизировать наплавку, выполняемую на мелких деталях (валах диаметром 10 мм и более).

Режимы автоматической наплавки в струе углекислого газа приведены в табл. 19; рекомендуемые составы защитных газов – в табл. 20.

Процесс наплавки можно осуществить при наложении на электрод дополнительной вибрации и прерывании дуги, когда мундштук сварочной головки вместе с проходящей через него сварочной проволокой вибрирует с частотой 100-110 Гц и амплитудой колебаний до 4 мм.

Вибрация электрода обеспечивает стабильность процесса благодаря частым возбуждениям дуговых разрядов, способствует подаче электродной проволоки небольшими порциями и лучшему формированию наплавленных валиков. Процесс наплавки может быть осуществлен при низком напряжении (12-18 В).

Высокое качество наплавки получают при токе обратной полярности (плюс на электроде, минус на детали), шаге наплавки 2,3-2,8 мм/об и угле подвода проволоки к детали 15-30 °.

Оптимальный режим наплавки: напряжение 28-30 В, сила тока 70-75 А (диаметр проволоки 1,6 мм), скорость подачи проволоки 1,3 м/мин, скорость наплавки 0,5-0,6 м/мин, амплитуда вибрации 1,8-2 мм.

Скорость наплавки (м/мин) определяют по частоте вращения детали, равной

$$n = 250 \frac{d^2 v_{\text{п}} \eta}{SDh},$$

19. Режимы автоматической наплавки поверхностей в среде углекислого газа

Диаметр детали	Толщина наплавляемого слоя	Диаметр электрода	Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость наплавки, м/ч	Смещение электрода	Шаг наплавки	Вылет электрода	Расход углекислого газа, л/мин
мм						мм			
10-20	0,5-0,8	0,8	70-90	16-18	40-45	2-4	2,5-3,0	7-10	6-8
20-30	0,8-1,0	1,0	85-110	18-20	40-45	3-5	2,8-3,2	8-11	6-8
30-40	1,0-1,2	1,2	90-150	19-23	35-40	5-8	3,0-3,5	10-12	6-8
40-50	1,2-1,4	1,4	110-180	20-24	30-35	6-10	3,5-4,0	10-15	8-10
50-60	1,4-1,6	1,6	140-200	24-28	30-20	7-12	4,0-6,0	12-20	8-10
60-70	1,6-2,0	2,0	280-400	27-30	20-15	8-14	4,5-6,5	18-25	10-12
70-80	2,0-2,5	2,5	280-450	28-30	10-20	9-15	5,0-7,0	20-27	12-15
80-90	25-3,0	3,0	300-400	28-32	10-20	9-15	5,0-7,5	20-27	14-18
90-100	0,8-1,0	1,0	100-300	18-19	70-80	8-10	2,8-3,2	10-12	6-8
100-150	0,8-1,0	1,2	130-160	18-19	70-80	8-12	3,0-3,5	10-13	8-9
200-300	0,8-1,0	1,2	150-190	19-21	20-30	18-20	3,0-3,5	10-13	8-9
200-400	1,8-2,8	2,0	350-420	32-34	25-35	18-22	4,5-6,5	25-40	15-18
200-400	2,6-3,2	3,0	380-450	32-34	25-35	20-25	5,0-7,5	25-50	15-18

20. Рекомендуемые составы защитных газовых сред при наплавке материалов

Свариваемые и наплавляемые материалы	Составы защитных газов при использовании электрода	
	Вольфрамового	Плавящегося
Малоуглеродистые стали	Комбинированная защита Ar + CO_2	1) CO_2 2) 90% Ar + 10% CO_2 3) Ar марки Г
Низко- и среднелегированные стали	1) Комбинированная защита Ar + CO_2 2) Ar марки В	1) CO_2 2) 90% Ar + CO_2 3) Ar марки Г
Коррозионно-стойкие хромоникелевые высоколегированные стали	1) Ar марки В 2) He 3) Комбинированная защита	1) Ar марки В 2) He 3) Ar марки Г 4) CO_2 5) 90% Ar + 10% CO_2
Жаропрочные хромоникелевые сплавы	1) Ar марки В 2) He	1) Ar марки В 2) He
Алюминий и алюминиевые сплавы	Ar марки В	1) Ar марок Б и В 2) 35% Ar + 65% He

где n – частота вращения детали, мин$^{-1}$; d – диаметр электродной проволоки; $v_п$ – скорость подачи проволоки, м/мин; η – коэффициент наплавки ($\eta = 0{,}85 \div 0{,}9$); S – шаг наплавки, мм/об. детали; D – диаметр детали, мм; h – толщина наплавляемого слоя, мм.

Вибродуговая автоматическая наплавка в защитной среде водяного пара с одновременным охлаждением детали отдельной струей жидкости создает благоприятные условия формирования и кристаллизации наплавленного слоя, уменьшает склонность наплавленного металла к образованию пор и трещин, позволяет регулировать структуру и твердость наплавленного металла путем установления

определенного расхода и места подвода охлаждающей жидкости, а также повышает прочность вследствие уменьшения дефектов в металле наплавки.

Для наплавки в среде водяного пара используют обычные сварочные полуавтоматы. Наплавку деталей проводят постоянным током обратной полярности (плюс на электроде, минус на детали).

Достаточно гладкий валик наплавленного металла с незначительной пористостью получают при скоростях наплавки 10-20 м/ч, силе тока 130-250 А, напряжении 36-48 В, скорости подачи проволоки 200-300 м/ч и ее диаметре 1,6-2 мм. Вылет электрода 20-26 мм. Оптимальная длина струи пара, подаваемая под углом 20-25° к вертикальной оси детали, l = 100 ÷ 150 мм. Режимы вибродуговой наплавки приведены в табл. 21 и 22.

При *вибродуговой наплавке в среде углекислого газа* проволокой из стали марок Х20Н10Г6 и 30ХГСА скорость подачи проволоки составляет 32-25 мм/с, расход углекислого газа 800-1200 л/ч (табл. 23).

Для уменьшения трудоемкости обработки резанием цилиндрических деталей, наплавленных износостойкими материалами большой твердости, применяют **комплексную технологию упрочнения** – одновременные наплавку, удаление шлаковой корки, фрезерование и шлифование наплавленного металла, что позволяет увеличить долговечность инструмента благодаря меньшей твердости наплавленного металла, имеющего температуру 400-1000 °С.

Пример. Наплавка на деталь из стали 45 проводилась пружинной проволокой 2-го класса под флюсом АН-348А с добавлением 2,5% графита и 2% феррохрома. Твердость поверхностного слоя наплавленного металла на остывшей до 120 °С детали составляет в этом случае 56-62 HRC.

При одновременной (с наплавкой) обработке резанием усилие резания Q уменьшается в 2-3 раза. За 150 мин обработки горячего металла при глубине фрезерования 0,6 мм износ режущей кромки резца с твердосплавными пластинками

21. Режимы вибродуговой наплавки стальных деталей

Диаметр детали	Толщина наплавленного слоя	Диаметр электродной проволоки	Сила тока, А	Скорость наплавки	Скорость подачи электродной проволоки	Расход охлаждающей жидкости, л/мин	Шаг наплавки, мм/об	Амплитуда вибрации проволоки, мм	Угол подачи проволоки к деталям, град
мм				м/мин					
20	0,3	1,6	120-150	2,2	0,6	0,2	1	1,5	35
40	0,7	1,6	120-150	1,2	0,4	0,4	1,3	1,8	
60	1,1	2	150-210	1	0,8	0,5	1,6	2	45
80	1,5		150-210	0,6	1	0,6	1,8		
100	2,5	2,5	140-210	0,3	1,1	0,7	2-3		

Примечание. Применяется постоянный ток обратной полярности, напряжение дуги 12-15 В.

22. Режимы вибродуговой наплавки чугунных деталей

Наплавочный материал	Толщина наплавленного слоя, мм	Скорость подачи электрода, м/мин	Сила тока, А	Число оборотов детали в минуту	Подача суппорта станка, мм/об	Припуск на механическую обработку на сторону (не менее), мм
Проволока Диаметром 1,6-1,8 мм	0,6-0,7	1,3	120-140	1200 : πD	1,8-2,2	0,4
	1,5	1,7	160-190	1000 : πD	2,3-2,8	0,8
	2,5-3			370 : πD	2,8-3,5	1
Проволока диаметром 2,5 мм			300-350	200 : πD	3,3-3,4	
Лента сечением 0,5 × 10 мм			320-340	200 : πD	7,9	

Примечание. D – диаметр направляемой детали, мм.

23. Режимы вибродуговой наплавки в среде углекислого газа

Толщина наплавленного слоя, мм	Диаметр электродной проволоки, мм	Сварочный ток, А	Рабочее напряжение, В
1,0	1,0 / 2,0	75-175 / 150-300	17-20 / 20-24
1,5	1,2 / 2,2	92-225 / 165-375	18-21 / 21-25
2,5	1,4 / 2,5	100-250 / 190-400	18-22 / 22-26
2,5	1,6 / 2,5	120-300 / 190-400	19-23 / 22-26
3,0	2,0 / 2,5	150-350 / 190-400	20-24 / 22-26

Примечание. В числителе – минимальное значение параметра, в знаменателе – максимальное.

Т15К6, Т5К10 и ВК8 составляет, соответственно, 0,26, 0,56 и 0,45 мм, в то время как при обработке наплавленного металла в холодном состоянии резцы выходят из строя через 5-20 мин из-за сколов или повышенного износа пластин. Режимы комплексной автоматической наплавки и обработки резанием приведены в табл. 24.

Наряду с методами автоматической электродуговой наплавки широко распространены **универсальные методы наплавки с использованием тепла газового пламени.**

Для газопламенной наплавки применяют присадочные материалы (табл. 25-29) в виде порошков или металлического стержня.

24. Режимы комплексной обработки автоматическая наплавка – фрезерование – шлифование

Параметры	Диаметр детали, мм		
	60	120	240
Частота вращения детали, мин$^{-1}$	3	2	0,75
Диаметр электродной проволоки, мм	1,6-1,8	1,8-2,0	2-3
Шаг наплавки, мм/об	3,5-4	3,5-4,5	4-4,5
Напряжение на дуге, В	20-22	22-24	25-27
Сила тока, А	190-200	200-220	260-280
Скорость подачи проволоки, м/мин	1,35-1,5	2,3-2,5	3-4,0
Вылет электрода, мм	15-25	15-25	15-25
Скорость фрезерования, м/мин	200-250	200-250	200-250
Подача на зуб фрезы, мм	0,1-0,15	0,1-0,15	0,1-0,15
Скорость шлифования, м/с	25-50	25-50	25-50
Подача шлифованного круга, мм	0,02-0,5	0,02-0,5	0,02-0,5

25. Наплавочные присадочные материалы на основе кобальта для газопламенной наплавки

Марка сплава	Среднее содержание компонентов в наплавленном слое, % (мас. доля)							Твердость HRC при температуре, °С	
	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Fe	20	650
КВ5Х30	1,0	1,2	1,0	29	2,0	4,6	4	42	26
КВ8Х30	1,3					8,5		47	30
КВ12Х30	2,4			32		2,15		55	36
КВ20Х30	2,7					19,0		60	53

Примечание. Остальное (до 100%) – кобальт.

26. Твердые сплавы, используемые в качестве присадочного материала при газопламенной наплавке

Сплав	Среднее содержание компонентов в твердом сплаве, % (мас. доля)					Твердость HRC наплавленного слоя
	C	W	Mo	Ni	Cr	
Релит	3,3	95	-	-	-	90-92
Вокар	9-10	90	-	-	-	85-90
Воломит	4	93	2	-	-	90-92
Карбиды хрома	5	-	-	25	70	90-92
Карбиды вольфрама	-	70-85*	-	-	-	-

* Остальное – сплав медь – никель – марганец.

27. Высокохромистые чугуны, применяемые в качестве присадочного материала при газопламенной наплавке

Марка сплава	Среднее содержание компонентов в наплавленном слое, % (мас. доля)							Твердость HRC наплавленного слоя
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	B	
У30Х30Н4С4	2,9	3,5	1,0	28	3,5	-	-	48-54
У45Х30Г6	4,5	1,8	6,0	30	-	-	-	58-63
У45Х17Г13С3	4,2	3,0	12	16	-	-	-	55-58
У35Х25Р	3,6	0,6	1,2	26	-	-	1,5	60-65
У35Х20РТ	3,6	0,6	1,8	21	-	1,5	1,2	56-62
У15Х6МФ *	1,8	1,9	1,2	6	3	-	-	46-48
У30Х30Н4С4Т	2,9	4,2	1,0	28	3,8	0,5	-	52-54

* Содержит также: 1,5% Mo; 1,32% V и 2,3% Nb.

28. Сплавы на основе никеля, применяемые в качестве присадочного материала при газопламенной наплавке

Марка сплава	Среднее содержание компонентов в никелевом сплаве, % (мас. доля)							Твердость HRC наплавленного слоя при температуре, °С	
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	B	20	50
Х15Н60	0,12	0,7	1,0	15	58	Остальное	-	18	-
Х20Н80	0,12	0,3	1,0	20	76	То же	-	18	-
НХ10Р2	0,45	2,3	-	11	80	3	2,5	35	29
НХ13Р3	0,60	4,0	-	13	76	4	3,0	45	42
НХ15Р4	0,75	4,5	-	15	70	4,5	3,5	56	48
ХН80СР2	До 0,1	0,8-1,5	-	15-18	До 80	-	2,0	-	-

Поверхности с особыми свойствами наплавляют металлическими электродами с качественными легирующими покрытиями.

Упрочнение и восстановление малогабаритных вырубных, прошивных и разделительных штампов со сложной гравюрой рабочей части методом наплавки дисперсионно-твердеющими сталями обеспечивает увеличение стойкости в 3-6 раз по сравнению со стойкостью термически обработанного ненаплавленного инструмента. Для упрочнения используют плавящиеся электроды типа ОЗИ-4, ОЗИ-5 и ХАДИМ-1, тип наплавленного металла – Х5М5В6К15Ф (электрод ОЗИ-4), Х2М10В11К18Ф (электрод ОЗИ-5), 5Х12В8МФ (электрод ХАДИМ-1). После наплавки получают металл с низкой твердостью, обычно не превышающей 30-40 HRC, что позволяет производить обработку резанием наплавленных поверхностей обычными резцами, фрезами и сверлами. После окончательной обработки резанием наплавленные штампы подвергают нагреву в термических печах до температур, обеспечивающих развитие процессов дисперсионного твердения. При нагреве во всем объеме наплавленного металла выделяются интерметаллидные упрочняющие фазы, что вызывает повышение его твердости HRC до требуемых значений: 49-56 для штампов горячего деформирования и 60-64 для штампов холодного деформирования. В процессе эксплуатации твердость наплавленного металла фактически не изменяется, что в итоге обусловливает увеличение стойкости штампов.

Технологический процесс изготовления штампов с применением наплавки предусматривает последовательное выполнение следующих операций: предварительную обработку резанием детали по контуру с припуском 0,20-0,23 мм под окончательную обработку резанием; термическую обработку по режимам, рекомендованным для применяемых марок сталей для обеспечения твердости основного металла 49-54 HRC; наплавку слоя высотой 12-14 мм (например, по торцу рабочей части пуансона) с припуском под обработку резанием по периметру наплавленного слоя до 2 мм; предварительную обработку резанием наплавленного слоя с припуском под окончательную обработку резанием; обработку резанием наплавленного слоя с припуском под окончательную обработку резанием; окончательную обработку резанием по всему контуру детали.

Пример. Пуансоны, изготовленные из стали 6ХВ2С для горячей прошивки круглых (диаметром 13,4-17,5 мм) и квадратных (сечением 13,4×13,4 мм) отверстий в заготовках толщиной 28 мм, наплавляют электродами диаметром 4 мм с защитно-

29. Сплавы, применяемые для индукционной и газопламенной наплавки

Марка стали	Содержание компонентов, % (мас. доля)								Температура плавления, °С	Твердость HRC	Относительная износостойкость
	C	Si	Mn	Cr	Ni	V	Ti	B			
У30Х28Н4С4 (сормайт-1)	2,5-3,5	2,8-4,2	До 1,5	25-31	3-5	-	-	-	1275	49-54	2,6
У45Х35Г3Р2С (ФБХ-6-2)	3,5-5,5	1-2,5	1,5-4	32-37	-	-	-	1,5-2,2	1330	60-63	5,0
У50Х40Н2С2Г (УС-25)	4,4-5,5	1,8-2,8	До 2,5	38-42	1-1,8	-	-	-	1320	58-64	3,6
У35Х717	1,8-5,2	0,4-0,9	4-8	4-10	-	-	-	-	1350	52-60	-
ХТ3У	3,5	4,5	1,5	28	-	1-5	3,2	-	1350	56-60	-
Рл50-У30Х28Н4С4	Репит + сормайт [-1]								1275	54-63	6,7
ФХ50-У30Х28Н4С4 (ПС-4)	Углеродистый феррохром (ФХ800) + сормайт [-1]								1275	58-64	5
ФХ60ФТ2-У30Х28Н4С4 (ПС-5)	Углеродистый феррохром (ФХ800) + ферротитан								1275	58-64	5,6
ФХ60-У30С2 (ПС-6)	Углеродистый феррохром (ФХ800) + белый чугун								1275	56-63	4,9

* *При испытании на машине Х4-Б; эталон из отожженной стали 45.*

легирующим покрытием, обеспечивающим получение наплавленного металла Х2Н8М12ВФ. Сила сварочного тока 120-140 А, напряжение дуги 27-30 В. Наплавку ведут короткой дугой обратной полярности.

Рабочую часть заготовок пуансонов выполняют на 10 мм короче, что предотвращает смешение основного и наплавленного металлов в зоне рабочего торца пуансона. Наплавку проводят в составных медных формах (рис. 38). Обработку резанием осуществляют режущим инструментом, армированным твердосплавными пластинами.

Упрочнение и восстановление аргонодуговой наплавкой рабочих поверхностей сложных фасонных геометрических фигур штампов, валков, пресс-форм, пресс-матриц и подобных инструментов для горячего прессования, изготовляемых из сталей типа 3Х2В8Ф. Восстанавливаемый и упрочняемый инструмент предварительно очищают от загрязнений в пескоструйной камере. Глубокие трещины разделывают. При глубине трещины до 2 мм ее края оплавляют аргонодуговой горелкой без присадочного материала. Перед наплавкой и оплавлением инструмент (например, из стали 3Х2В8Ф) нагревают в электропечи до 750-800 °С. Режим наплавки: сила тока 100 А, полярность прямая, расход аргона 5-10 л/мин. Присадочный материал: наплавочная проволока диаметром 3 мм из инструментальной стали мартенситно-карбидного класса типа 65Х3В10МФГТ.

Способ позволяет получить беспористый слой износостойкого металла, сократить трудоемкость слесарнодоводочных работ, повысить стойкость инструмента.

Наплавка порошковыми проволоками и легированными электродами в ряде случаев позволяет заменить инструментальные стали (например, 5ХВ2С и Р6М5) конструкционной сталью Ст3 и многократно восстановить изношенные детали. Режимы наплавки приведены в табл. 30. наплавку порошковой проволокой ПП-АН170 осуществляют на полуавтомате типа АН-765.

Заготовки перед наплавкой подогревают до 300-350 °С, а после наплавки подвергают высокому отпуску при 650 °С в течение 2 ч для снятия внутренних напряжений и термофиксации размеров. Наплавленный металл обрабатывают абразивным инструментом. Химический состав наплавленного металла приведен в табл. 31. Срок службы наплавленных ножей увеличивается в 2-2,5 раза по сравнению с ножами из инструментальных сталей.

Восстановление изношенных поверхностей деталей, работающих при умеренной ударной нагрузке. Перед наплавкой на восстанавливаемую поверхность детали наносят слой (толщина 5-6 мм) порошковой смеси угольнометаллических порошков C, Cr и Fe; C, Cr, B и Fe; C, Cr, W и Fe на связующем – натрие-

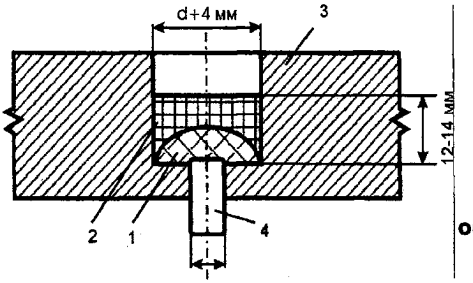


Рис. 38. Разъемная форма для наплавки торца пуансона: 1 – зона смешения наплавленного и основного металлов; 2 – наплавленный металл; 3 – медные полуформы; 4 – рабочая часть пуасона

30. Режимы наплавки порошковой проволокой и сложнолегированными электродами

Тип наплавленного материала	Диаметр электрода, мм	Напряжение на дуге, В	Сила тока, А	Скорость подачи электродной проволоки, м/ч	Число наплавляемых слоев
ПП-АН 170	3,2	30-40	320-380	158	3
ИН-1	5	24-28	150-180	-	4

31. Химический состав металла, наплавленного порошковой проволокой и сложнолегированными электродами

Тип наплавленного металла	Содержание компонентов в наплавленном металле, % (мас. доля)				
	C	Mn	Si	Cr	W
ПП-АН-170	0,5-0,7	0,4-0,6	0,4-0,5	18-22	2,5-2,9
ИН-1	0,3-0,4	0,8-1,0	0,6-0,7	2,1-2,4	6,8-8,2
Тип наплавленного металла	**Содержание компонентов в наплавленном металле, (мас. доля)**				**Твердость HRC наплавленного металла**
	V	Ti	S	P	
ПП-АН 170	-	0,2-0,4	0,04	0,04	54-58
ИН-1	0,2-0,3	-	0,04	0,04	52-54

вой карбон-метил-целлюлозе. Высушивают в течение 8 ч при нормальной температуре. Наплавку проводят угольным электродом диаметром 10 мм при отрицательной полярности сварочным током 250 А.

Повышение стойкости режущих инструментов из быстрорежущих сталей. На переднюю поверхность резца вблизи вершины главной режущей кромки наносят порошки карбидов вольфрама, титана, тантала и других металлов или, например, оксидов, нитридов, боридов, в том числе кубического нитрида бора зернистостью 10-300 мкм, с последующим оплавлением их с помощью источников высоких энергий: плазменного луча, электронного луча и т. д. диаметром 0,03-0,1 мм и образованием ванночек расплава. Наилучшие результаты дает расположение ванночек расплавленных составов на расстоянии 0,3-1 мм от вершины резца.

По сравнению с обычным инструментом из быстрорежущей стали резцы, наплавленные карбидом вольфрама, имеют более высокую стойкость: в 25 раз при высоких скоростях; в 8 раз при средних; в 3 раза при низких. Резцы, на которые нанесен карбид титана и тантал, обладают стойкостью в 2 раза большей, чем резцы, покрытые карбидом вольфрама; кубический нитрид бора еще больше повышает их стойкость. Ванночки расплава необходимо располагать на расстоянии 0,3-1 мм от вершин резца. Описанный способ повышения стойкости инструмента прост и обеспечивает значительный экономический эффект.

Скоростная наплавка твердых сплавов. Подлежащий наплавке участок детали включают в цепь тока высокой частоты (50-10 000 кГц). Одновременно в нем с помощью индуктора индуцируют ток. Прямой и индуцированный ток, проходя через поверхностный слой участка детали, быстро (до 3 с) нагревает ее до расплавления. В расплав засыпают порошок твердого сплава, карбида вольф-

рама, оксида алюминия, нитрида кремния, карбида кремния и других твердых и сверхтвердых материалов зернистостью менее 0,25 мм. Находясь в жидком металле, порошок после отверждения металла прочно в нем удерживается, образуя износостойкое покрытие.

Для наплавки детали на заданной длине поверхности индуктор с контактами плавно перемещают вдоль этой поверхности, непрерывно посыпая порошком расплавленный слой, в результате чего создается равномерное покрытие. Высокая скорость наплавки достигается благодаря концентрации и большой плотности энергии (например, 20 кВт/см^2) на небольшом участке поверхности детали. Расстояние от проводника-индуктора до поверхности наплавляемой детали зависит от частоты тока и толщины нагреваемого слоя и равно 0,05-1 мм. Индукторный проводник, обычно выполняемый из медной трубки, охлаждается изнутри водой.

Наплавка хромоникелевого покрытия с включениями распределенных карбидов вольфрама. Область применения – кондукторные втулки, клапанные уплотнения, распылители и другие детали из инструментальной или легированной стали. Поверхность очищенной детали покрывают слоем консистентной густой смазки, состоящей из клея, порошка Ni-Cr-сплава, смешанного с раствором борной кислоты в дистиллированной воде. Размер зерен порошка не должен превышать нескольких мкм.

Влажный клей посыпают WC-порошком и высушивают при 176-204°С до полного выпаривания влаги. После охлаждения детали до нормальной температуры на деталь вновь наносят слой клея приведенного состава, а на влажный клей – слой Ni-Cr-порошка. Деталь с нанесенным покрытием толщиной 0,15-0,20 мм высушивают при температуре 176-204 °С до полного выпаривания влаги; охлаждают до нормальной температуры и помещают на 3-5 мин в вакуумную печь с температурой 1040-1097 °С. В печи порошок Ni–Cr-сплава плавится и заполняет промежутки между WC-зернами. Заключительными операциями являются закалка и отпуск детали.

Затем поверхность детали подвергают обработке резанием. Окончательная толщина покрытия составляет приблизительно 0,08 мм. Стальная деталь с покрытием до твердости не уступает детали, целиком изготовленной из WC. В то же время основной материал детали сохраняет коэффициент расширения, характерный для стали, что позволяет избежать хрупкости покрытия, присущей WC.

Поверхностное легирование крупногабаритных деталей (типа прокатных валков) методом локальной электроконтактной наплавки порошками из легирующих элементов можно выполнить способом [а. с. 865974 (СССР)], по которому поверхность, подлежащую легированию, вначале предварительно обрабатывают резанием (точением или шлифованием) с заданными параметрами шероховатости и необходимым объемом впадин, образованных микронеровностями. В полученные впадины насыпают порошок из легирующих элементов (хрома, вольфрама, молибдена и др.) и одновременно проводят обработку поверхности изделия давящим инструментом (например, обкатывают твердосплавным роликом). Через контакт давящего инструмента с изделием пропускают электрический ток низкого напряжения.

Изменением шероховатости (параметра *Rz)* поверхности, т. е. размеров (объема) впадин микронеровностей, образуемых предварительной обработкой резанием, достигают заданной степени (насыщенности) легирования поверхностного

слоя и расхода легирующих элементов, т. е. регулированием параметров шероховатости поверхности можно управлять процессом *поверхностного легирования.*

Локальный нагрев изделия совместно с нанесенным порошком легирующих материалов, сосредоточенный только в зоне контакта давящего инструмента с изделием, происходит без наличия окисляющей среды. В результате и благодаря этому получают гладкую, чистую и упрочненную поверхность без оксидов и окалины, с плотным поверхностным слоем, обладающим повышенной термической и механической стойкостью.

Пример. Легирование рабочей поверхности прокатного валка осуществляют на токарном станке, в центрах которого устанавливается изделие. Перед легированием рабочую поверхность предварительно обтачивают, обеспечивая заданную шероховатость. Затем в резцедержатель токарного станка вместо резца устанавливают и электрически изолируют давящий инструмент (например, ролик из твердого сплава марки Т15К6). Перед давящим инструментом устанавливают на суппорте станка и вводят в контакт с рабочей поверхностью порошкоподающее устройство. Обработку вала осуществляют поверхностным пластическим деформированием с электроконтактным подогревом. Электроконтактный нагрев металла и легирующих элементов происходит только в зоне контакта давящего инструмента с изделием при включении их в цепь вторичной обмотки понижающего трансформатора.

Сила прижатия давящего инструмента в процессе выглаживания или обкатывания равна 500-1000 Н, скорость выглаживания υ = 12÷15 м/мин, подача S = 1,0 мм/об (для инструмента с тороидальной поверхностью R = 30 мм, r = 5 мм), плотность тока 400-600 А/мм^2.

Во время обработки поверхностным пластическим деформированием в зоне деформирования металл с легирующими элементами нагревается до пластического состояния. Создаются благоприятные условия для диффундирования легирующих элементов в поверхностный слой изделия. Засыпка легирующего порошка во впадины шероховатости проводится в процессе обработки изделия поверхностным пластическим деформированием. Порошок, засыпанный во впадины микронеровностей, надежно удерживается в них благодаря наличию на поверхностях впадин ультромикронеровностей и остаточного магнетизма, образующегося после обработки резанием. В зоне контакта давящего инструмента с изделием на поверхности изделия осуществляется металлургический процесс, протекающий фактически в закрытом объеме под давлением при высокой температуре и без доступа окисляющей среды. В результате на детали образуется легированный поверхностный слой повышенной твердости с плотной структурой, гладкой упрочненной поверхностью и высокой термической и механической стойкостью.

Детонационный метод нанесения порошковых покрытий основан на использовании энергии детонации в газах. Металлический или металлизированный порошок наносят с помощью взрыва ацетиленокислородной смеси, обеспечивающего скорость набрасывания частиц порошка до 800-900 м/с. Прочное соединение распыленных частиц порошка с подложкой смеси и ее взрыв происходят в специальной камере, куда порошок подается струей азота.

Подложка при взрыве совершает поступательное или вращательное движение. Материалы порошков: карбиды вольфрама и титана, оксиды алюминия и хрома, хром, кобальт, титан и вольфрам. Каждый взрыв, продолжающийся 0,2-0,23 с, образует слой покрытия толщиной 7 мкм. Многослойное покрытие может

иметь толщину 0,02-0,4 мм. Покрытия из этих порошков имеют большую твердость и очень высокую износостойкость. В результате такого напыления образуется покрытие с высокими эксплуатационными характеристиками, прочностью сцепления и малой пористостью, в большинстве случаев не превышающей 1%.

Существенным преимуществом метода является умеренный нагрев обрабатываемой детали – не выше 250 °С.

Технологические возможности детонационного способа позволяют наносить покрытия на следующие поверхности: внешние цилиндрические диаметром до 1000 мм, внутренние цилиндрические диаметром более 15 мм, плоскости сложной конфигурации. Наиболее эффективно нанесение детонационных покрытий на детали, работающие в условиях повышенных давлений и температур, а также износа в агрессивных средах.

Пример. Детонационно-газовые твердосплавные покрытия наносят на рабочие поверхности гибочных штампов, изготовленных из стали типа Х12М, термически обработанных да твердости 56-60 HRC. Исходный материал для напыления – механическая твердосплавная смесь ВК-15. Детонационное покрытие, получаемое напылением этой смеси, отличается высокой износостойкостью и способностью воспринимать ударные нагрузки.

Перед напылением рабочую форму штампа следует очистить от загрязнений и создать на ее поверхности шероховатый рельеф, например, методом струйной обработки абразивными порошками. После окончания напыления поверхность, покрытую твердосплавными порошками, дополнительно шлифуют или полируют алмазными пастами. Метод технологически доступен и экономически эффективен, в том числе в условиях единичного многономенклатурного производства.

Плазменное напыление композиционных порошковых материалов, состоящих из твердой тугоплавкой основы и легкоплавкой связки, является перспективным методом нанесения покрытий. Эксплуатационные свойства таких покрытий зависят от физико-механических свойств порошковых материалов, температурных и газодинамических параметров плазмы и подготовки поверхности под напыление.

Пример. Упорные центры и поправки к насадным зенкерам подвергают напылению порошковыми композициями, обеспечивающими создание износостойких слоев на рабочих поверхностях инструментов, подверженных трению. Состав композиций подбирают, исходя из общей оценки условий работы поверхности, в том числе с учетом возможности отвода теплоты, свойств сопрягаемых материалов трущейся пары, требований к качеству поверхности и точности ее начальных размеров и др.

Структура нанесенного слоя состоит из хромоникелевого раствора и карбидной фазы, включающей зерна релита и упрочняющие частицы связки – карбиды и бориды хрома.

Метод плазменных наплавки и напыления композиционных порошковых материалов применяют для создания упрочняющих покрытий на трущихся поверхностях деталей типа поршневых колец, втулок цилиндров и шеек коленчатых валов, двигателей внутреннего сгорания, плунжерных пар насосов, направляющих колонок и втулок штампов и пр. В табл. 32-35 приведены режимы плазменной наплавки металлов и режимы плазменного напыления соответственно нитридов и карбидов, оксидов и боридов, чистых металлов и неметаллов.

32. Рекомендуемые режимы плазменной наплавки металлов

Размер изделия, мм		Сила тока, А		Расход газа, л/ч		Амплитуда колебаний, мм	Частота колебаний, мин$^{-1}$
Толщина	Диаметр	Электрод – изделие	Электрод – присадочная проволока	Плазмообразующего	Защитного		
Прямая полярность							
5-8	-	-	140-170	150-160	1000-1100	10-40	30-50
10-20	-	-	160-180	160-170	1100-1200		
22-40	-	-	190-210	160-180			30-40
50-100	-	40-80	200-210	170-180	1200		
-	30-40	-	140-150	150	1000-1100	10-30	40-50
-	50-70	-	160-190	150-160	1100-1200		35-50
-	80-100	-	190-210	160-170			30-50
-	100-200	0-60	210-240	160-170	1200	10-40	30-40
-	200-500	60-90	230-250	170			
Обратная полярность							
8-20	-	100-140	90-150	160-180	800-900	10-60	20-40
22-40	-	140-180	140-170		900-1000		
50-100	-	180-220	170-220				
-	50-100	100-200	90-150	180-200	800-900	10-30	20-30
-	100-200	140-220	140-200		900-1000		25-40
-	200 - 500	180-200	160-200				

33. Режимы плазменного напыления нитридов и карбидов

Напыляемый материал	$N_п$, кВт	$I_д$, А	$C_п$		$C_т$		$C_м$	$d_ч$, мкм	l, см
			Ar	Nr	Ar	Nr			
			г/с						
TiN	22,4	260	-	0,64	-	0,1	0,13	15-55	7
	14,5	500	1,05	-	0,3	-	-	44	-
ZnN	24	300	-	0,64	-	0,1	0,16	10-55	7,5
B_4C	21	725	0,81	-	0,49	-	-	63	-
Cr_3C_2	7,25	250	1,01		0,3				
TaC	19,5	750	0,67		0,22			44	
TiC	19,6	725						63	
WC	13,1	525	0,81		0,19				
	12,5	500			0,27				
ZrC	19,6	725			0,24				

Обозначения: $N_п$ – полная мощность плазмотрона; $I_д$ – ток дуги; $C_п$, $C_т$ и $C_м$ – расходы соответственно плазмообразующего и транспортирующего газов, материала (порошка); $d_ч$ – размер частиц порошка; l – дистанция напыления.

34. Режимы плазменного напыления оксидов и боридов

Материал	$N_п$, кВт	$I_д$, А	$C_п$		$C_т$		$C_м$	$d_ч$, мкм	l, см
			Ar	Nr	Ar	Nr			
			г/с						
Al_2O_3	13,5	450	1,01	-	0,38	-	-	44	-
$Al_2O_3 \cdot SiO_2$	14	400	1,48	-	0,38	-	-	44	-
Cd_2O_3	14	500	0,81	-	0,27	-	-	63	-
MgO	22,5	750	0,81	-	0,24	-	-	44	-
TiO_2	20,2	750	0,47	-	0,27	-	-	44	-
V_2O_3	15,4	550	0,81	-	0,27	-	-	63	-
Cr_2O_3	18,7	220	-	0,43	-	0,21	-	20-50	9,5
ZnO_2	19,2	600	1,35	-	0,32	-	-	44	-
	20	-	0,77	-	0,06	-	0,17	43-74	10
UO_2	20	-	0,77	-	0,08	-	0,5	43-74	10
BeO	30	-	0,90	-	0,21	-	-	20-60	7,5
Mo_2B_5	21,6	310	-	0,6	-	0,21	-	40-80	10
CrB_2	11,2	400	0,81	-	0,32	-	-	63	-
TiB_2	14,8	550	0,81	-	0,27	-	-	44	-
	20,6	260	-	0,64	-	-	0,11	10-40	8,8
ZrB_2	17,5	650	0,74	-	0,3	-	-	63	-
	20,3	260	-	0,64	-	-	0,13	10-37	9,0
NbB_2	20,8	260	-	0,64	-	-	0,11	10-53	9,0
TaB_2	20,3	260	-	0,64	-	-	0,25	10-53	9,0

Примечание. Обозначения см. в табл. 33.

35. Режимы плазменного напыления чистых металлов и неметаллов

Напыляемый металл	$N_п$, кВт	$I_д$, А	$C_п$		$C_т$		$d_ч$, мкм	l, см
			Ar	Nr	Ar	Nr		
			г/с					
B	21,8	750	0,81	-	0,35	-	44	-
Al	4,37	175	0,68	-	0,19	-	74	-
	22,4	280	-	0,43	-	0,21	30-60	8
Cr	15	500	1,01	-	0,24	-	63	-
	16,5-18	300	0,4	0,54	-	0,21	30-46	10
Fe	8,4	300	0,81	-	0,22	-	44	-
Co	11,6	400	0,81	-	0,27	-	63	-
Ni	18,8	650	0,81	-	0,38	-	63	-
	16-18	200	-	0,53 – 0,6	-	0,21	30-120	12
Cu	16	500	1,35	-	0,27	-	44	-
	17,6	220	-	0,56	-	0,21	40-60	13
Zn	6,4	200	1,48	-	0,24	-	63	-
Mo	13	450	0,81	-	0,27	-	63	-
	21-25	265	-	0,57	-	0,21	30-46	13
Ta	16	550	0,81	-	0,27	-	63	-
W	14,9	550	0,81	-	0,24	-	44	-
	22,5	300	-	0,58	-	0,13	30-46	8
Au	7	250	0,81	-	0,32	-	63	-

Примечание. Обозначения см. в табл. 33.

Метод термонапыления заключается в бомбардировании обрабатываемой поверхности (например, упорных центров, оправок к гидрокопировальным станкам, гибочных и раскатных роликов, направляющих оправок к насадному инструменту, борштанг, прессовых оправок и др.) частицами порошка, разогретыми до пластического состояния. Передача тепловой и кинетической энергий частицам порошка осуществляется плазменным (введением порошковых материалов в плазменную струю) и газопламенным (с введением порошков в газовую смесь) способами.

Для устойчивой работы плазмотрона электрическая дуга должна быть сформирована и стабилизирована вдоль продольной оси плазмотрона.

Используются порошки самофлюсующихся сплавов системы Ni-Cr-B-Si-C марок СНГН, ПГХН80СР и ВСНГН с температурой плавления 1050 °С, зернистостью 20-150 мкм, обеспечивающие твердость 35-62 $HRC_э$.

Недостатками плазменно-напыленных покрытий являются низкие прочность сцепления с основой, адгезионная прочность и термостойкость покрытия, что связано с различными коэффициентами температурного расширения покрытия и основы. Обладая значительной пористостью, плазменно-напыленные покрытия не защищают поверхность от окисления, что приводит к ускоренному разрушению (отслаиванию) покрытия.

Увеличить адгезионную прочность, термостойкость и стойкость покрытия в окислительных средах можно следующим способом [а. с. 676641 (СССР)]. На металлическую поверхность изделия наносят газотермическим напылением порошковое покрытие. Затем подвергают ее азотированию любым из известных способов до образования нитридной прослойки.

Так как порошковое покрытие пористое, то оно не препятствует диффузии атомов азота к поверхности защищаемого металла. Наоборот, благодаря усилению адсорбционных и абсорбционных процессов ускоряется насыщение поверхности основного металла азотом и образование в поверхностном слое нитридов тех элементов, которые входят в состав защищаемого металла (железа, хрома, вольфрама, титана, алюминия и др.). Поскольку нитриды имеют плотность меньшую, чем металлы (плотность оксидов 3-5 г/см^3, а плотность стали 7,8 г/см^3), то при своем образовании они заполняют микропоры порошкового покрытия, увеличивая тем самым сцепляемость по типу механического зацепления. Одновременно повышается термостойкость покрытия, так как образовавшиеся нитриды играют роль прослойки, коэффициент термического расширения которой близок к значению порошковых материалов, созданных на основе оксидов. Нитридная прослойка обеспечивает также коррозионную стойкость защищаемого металла.

Повышение рабочих характеристик поверхностных слоев дейдвудных валов при их восстановлении

Дейдвудные валы являются важным конструктивным элементом силовой судовой установки. Они передают крутящий момент от главного дизеля к винту судна и имеют размеры до 900 мм диаметром и 10 м длиной. В процессе эксплуатации поверхности дейдвудных валов постепенно выходят из строя, приобретая ряд дефектов и разрушений.

При восстановлении дейдвудных валов в основном применяют следующую технологию восстановления. Сначала на прогретый до 350 °С вал наплавляют проволоку типа Св08А, Св08ГС или ленту 08кп, 10сп, после чего наплавляют

слой, обладающий высокими коррозионными и износостойкими свойствами, используя проволоку Св04Х19НПМ3, Св08Х20Н9Г7Т или ленту 08Х18Н10Т. Наплавленный вал обворачивают асбестовым полотном и при медленном вращении на токарном станке охлаждают до 50 °С. Затем осуществляют ряд операций механической обработки.

Проф. А.Н. Евдокимовой и *проф. В.П. Сторожевым* предлагается определенное совершенствование технологии. Сначала поверхностную корку наплавленного слоя протачивают резцом, затем осуществляют операцию упрочнения поверхности деформирующими роликами или другими методами. Конечной операцией является шлифование на чистовых режимах. В этой принятой заводами технологии имеется определенный резерв, использование которого должно привести не только к упрощению процедуры обработки дейдвудного вала, но и к увеличению его коррозионной стойкости и износостойкости. Как известно, наплавочные и сварочные операции приводят к образованию значительных по величине растягивающих напряжений в поверхностных и подповерхностных слоях. Эти напряжения способствуют развитию усталостных процессов, повышают коррозионную способность рабочих поверхностей и снижают их износостойкость. Применение операции медленного охлаждения дейдвудного вала с наплавленной поверхностью в большинстве случаев уменьшают, но не снимают полностью растягивающие напряжения. Снятие же резцом после этого части наплавленного поверхностного слоя в виде корки снова образует растягивающие напряжения первого рода с текстурой, вытянутой в направлении выхода обработанной поверхности из-под резца. Последующая обработка роликами приводит к пластическому деформированию слоев и возникновению напряжений сжатия с движением металла по обе стороны от оси ролика и в значительно меньшей степени – в плоскости его вращения. В результате в материале сохраняется предыстория предшествующих видов механической обработки, в изменение которой вносит определенный вклад последующее чистовое шлифование вала, применяемое для получения требуемых размеров и шероховатости поверхности.

Установлено, что после наплавки с естественным охлаждением в поверхностных слоях возникают напряжения растяжения порядка 400 МПа. Если охлаждение после наплавки электродной проволоки осуществлять с использованием термоизолированной асбестовой шубы, замедляя тем самым процесс охлаждения, то внутренние напряжения растяжения в поверхностных слоях значительно уменьшаются. Обработка проходным резцом на токарном станке снимает корку и часть наплавленного поверхностного слоя, но вносит свои растягивающие напряжения. Получается, что уменьшенные или даже сведенные практически к нулю растягивающие напряжения после медленного охлаждения образцов в термоизоляции снова возникают, но уже за счет механической обработки. Так как по принятой на судоремонтных заводах технологии после обработки резцом проводят выглаживание цилиндрической поверхности дейдвудного вала упрочняющими роликами, то это формирует напряжения сжатия порядка 200-250 МПа.

Однако практика применения упрочняющих роликов показала, что эта технологическая операция образует волнистую поверхность по длине образующей дейдвудного вала. Для снятия этой волнистости применяют последующее шлифование, что снимает часть упрочненного слоя с высокими напряжениями сжатия и вносит свои напряжения растяжения, хотя и незначительные. Таким образом, получается вновь сформированная поверхность с ухудшенными свойствами.

Повышение качества наплавленных поверхностных слоев проводили в два этапа. На первом этапе было осуществлено шлифование абразивным кругом по наплавленной поверхности с одновременным снятием припуска и упрочнением поверхностных слоев, образовавшихся после снятия этого припуска. Были использованы обычные абразивные круги типа ЗЗА16НСТ2К6 при скорости круга 30 м/с, глубиной резания 0,15-0,20 мм при скорости вращения детали 0,01 м/с. Смазка осуществлялась не сульфофрезолом, а с использованием индустриального масла.

При шлифовании учитывалось, что упрочняющий эффект зависит от величины удельной поверхностной энергии Е (Дж/мм^2). Так, по нашим расчетам для получения максимальной твердости упрочненного слоя порядка $10 \cdot 10^3$ МПа следует ввести в обрабатываемый шлифованием наплавленный слой удельную энергию порядка 60 Дж/мм^2. Этой энергии, по данным работы, вполне достаточно для создания белого слоя толщиной 0,5 мм и даже более, в зависимости от условий охлаждения. Однако в действительности получается меньшая толщина белого слоя.

После упрочняющего шлифования с одновременным снятием части наплавленного слоя вместе с поверхностной коркой на втором этапе проводилось чистовое шлифование на тонком режиме для получения требуемой геометрии и шероховатости поверхности вала, а затем определение ряда показателей, характеризующих свойства упрочненного слоя. Так, упрочняющее шлифование с образованием сплошного белого слоя вызывает в поверхностных слоях в два раза большие напряжения сжатия, чем обработка поверхности роликами. Снятие тонкого поверхностного слоя последующим финишным шлифованием несколько уменьшает сжимающие напряжения в поверхностных слоях, однако оставляет их достаточно высокими – до 450...500 МПа на глубине порядка 20-40 мкм.

Измерение микротвердости наплавленной поверхности после упрочняющей обработки абразивным кругом и последующего тонкого шлифования показывает ее увеличение до $9{,}5 \cdot 10^3$ МПа, что более чем в два раза выше, чем достигаемое упрочнение с применением холодного пластического деформирования роликами ($4{,}2 \cdot 10^3$ МПа). Полученные белые слои обеспечили повышение коррозионной стойкости упрочненных шлифованием поверхностных слоев.

Упрочненные шлифованием образцы, а также образцы, обработанные по заводской технологии, подвергались испытаниям на износ, которые проводились в морской воде с добавлением пяти процентов корундового порошка с фракцией 5-8 мкм. Оказалось, что применение упрочнения абразивным шлифованием на 40% повышает износостойкость наплавленных поверхностных слоев по сравнению с принятой заводской технологией, включающей после наплавки проволоки обработку резцом, роликами и тонким шлифованием.

Таким образом, применение технологии упрочнения рабочих поверхностей с помощью шлифовального абразивного круга может представлять практический интерес при восстановлении наплавкой дейдвудных валов с одновременным улучшением рабочих характеристик и поверхностных слоев.

Применение методов наплавки и напыления износостойких и прочных слоев металла на рабочие поверхности деталей машин и технологической оснастки позволяют не только обеспечить их упрочнение, но и решить комплекс взаимосвязанных технических и экономических задач, направленных на сбережение ресурсов. К таким задачам относятся: снижение удельной металлоемкости изделия и его элементов на единицу основной характеристики повыше-

нием их прочности и уменьшением массы благодаря применению объемно- и поверхностно-упрочненных материалов. Восстановление изношенных поверхностей (например, шеек коленчатых валов, элементов гравюр штампов для горячей штамповки и др.) методами наплавки и напыления позволяет совместить процессы создания новых слоев металла взамен изношенных с процессами их упрочняющей обработки.

Методы напыления широко используют для восстановления и упрочнения деталей автомобилей, тракторов, сельскохозяйственной техники, подвижного железнодорожного состава, инструментов и др.

Отличительной особенностью покрытий, нанесенных способами газотермического напыления, является их пористость. Она зависит от способа напыления, типа и марки напыляемого материала, режима его нанесения и др. При прочих равных условиях пористость покрытий, нанесенных электродуговой металлизацией, составляет 15-20%; плазменным напылением – 2-20%; детонационным напылением – 0,2-1,5%. Пористость покрытий может оказывать положительное влияние на их износостойкость и ресурс, так как поры хорошо удерживают смазку. Пористое покрытие имеет пониженную механическую твердость. При нарушении работы фильтров системы смазки поры могут накапливать продукты износа, что приводит к выходу из строя сопряженной детали.

Упрочнение и восстановление деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания при нормальных и повышенных температурах (до 500 °С), проводят газотермическим (плазменным) напылением порошков из высоколегированных чугунов марок ПГ-С27, ПР-С1, ПГ-ФБХ6, ПГ-УС25. Для восстановления и упрочнения деталей, работающих в условиях газовой коррозии и абразивного изнашивания при высоких температурах, выполняют газотермическое напыление порошком из высоколегированного чугуна марки ПР-ЧЮ22СГ.

При плазменном напылении деталей из алюминиевых сплавов используют смесь из порошков АКЛ (95%) и ПМС-2 (5%).

Для газопорошковой наплавки чаще всего применяются металлопорошковые самофлюсующиеся материалы. Детали из чугуна упрочняют и восстанавливают, применяя порошковые сплавы (табл. 36). Стальные детали наращиваются сплавами типа ПГ-ХН80СР на никель-хромистой основе. Химический состав и твердость наплавленного слоя приведены в табл. 37.

Характеристики порошковых материалов для детонационного напыления покрытий приведены в табл. 38; физико-механические характеристики некоторых детонационных покрытий – в табл. 39.

36. Порошки для нанесения покрытий из сплавов на основе железа

Марка порошка	Содержание компонентов, % (мас. доля)								
	C	Mn	Cr	Ni	V	Ti	Al	B	Cu
ПР-180Х16Н8ФТ3Р	1,8	-	16	8	8	3	-	1,5	-
ПР-СХ20Н8106Т2Р2	-	-	20	8	-	2	5,5	2,5	-
ПР-150Г10Т11Р5	1,0	10	-	-	-	11	-	5	-
ПР-150Х12Ф6Д	1,5	-	12	-	6,5	-	-	-	0,4
ПР-290Х14Ф12Д	2,9	-	14,5	-	12	-	1,0	-	-
ПР-0Х18Н9Т	-	-	18	9	-	0,7	-	-	-
ПР-Х23Н28М3Д3Т	-	-	23	28	-	1,0	-	-	3,0

37. Химический состав порошковых сплавов и характеристики твердости слоя, наплавленного газопорошковой наплавкой

Марка порошкового сплава	Содержание компонентов, % (мас. доля)			
	Si	B	Fe	Cu
НПЧ-1 НПЧ-2	1,3-1,5 2,4-2,7	1,2-1,5 2,2-2,7	0,1-0,7 0,3-1,0	4-5
НПЧ-3	0,2-0,95	0,7-1,1	0,1-0,7	Остальное
ПГ-ХН80СР2 ПГ-ХН80СР3	1,5-3,0 2,5-4,5	1,5-2,5 2,0-3,0	5,0	-
ПГ-ХН80СР4	3,0-5,0	2,5-4,0		

Марка порошкового сплава	Содержание компонентов, % (мас. доля)			Твердость напыленного слоя
	C	Ni	Cr	
НПЧ-1 НПЧ-2	0,1-0,3	Остальное	-	HB: 190-235 300-400
НПЧ-3	0,2	41-60		180-200
ПГ-ХН80СР2 ПГ-ХН80СР3	0,3-0,6 0,4-0,8	Остальное	12,0-15,0 13,5-16,5	NRC: 35 45
ПГ-ХН80СР4	0,6-1,0		15,0-18,0	55

38. Порошковые материалы для детонационного напыления

Материал	Марка материала	Содержание компонентов, % (мас. доля)
Глинозем (оксид алюминия)	Г-00, ГО	$Al_2O_3 \geq 99,5\%$
Алюмомагнезиальная шпинель	ГШП	$Cr_2O_3 \geq 99\%$
Карбид:		MgO, $Al_2O_3 \geq 95\%$
хрома	-	-
вольфрама	-	-
титана	-	-
Для детонационного напыления износостойких покрытий	ВК-6	WC 94; Co 6
	ВК-10	WC 90; Co 10
	ВК-15	WC 85; Co 15
	ВК-20	WC 80; Co 20
	ВК-30	WC 70; Co 30
	ВН-6	WC 94; Ni 6
	ВН-10	WC 90; Ni 10
	ВН-15	WC 85; Ni 15
	ВН-20	WC 80; Ni 20
	ВН-30	WC 70; Ni 30
Порошок:		
ЖЛ	ЖЛ-1	Fe – основа, легирующие добавки Al и B
НХЛ	НХЛ-1	Ni – Cr – основа, легирующие добавки Al и B
НЛ	НЛ-1	Ni – основа, легирующие добавки Al и B
НЖЛ	НЖЛ-1	Коррозионно-стойкая сталь – основа, легирующие добавки Al и B
НХ16С3Р4	ПГАН60	Ni 70-77; Cr 14-18; B 2,8- 3,8; Fe 3; Si 2,5-3,5; C 0,9-1,8

39. Физико-механические характеристики детонационных покрытий

Материал покрытия	Микротвердость, МПа	Пористость, %	Прочность сцепления с основой, МПа	Максимальная температура эксплуатации, °С
92% WC + 8% Co	12 000-15 000	0,4-0,5	180-210	560
85% WC + 15% Co	12 500-14 500	0,2-0,5	220-250	560
25% WC + 7% Co Ni + карбиды Ti и Cr	10 000-12 000	0,5	180	780
85% Cr_3C_2 + 15% нихрома Ni	10 000-12 000 3 500-3 800	0,5 0,1-0,15	180-210 250-300	1000 1000
80% Al_2O_3 + 20% Ni	6 000-10 000	0,5-1,0	70-100	1000
60% Al_2O_3 + 40% Ni	5 000-6 000	0,5-1,0	80-130	1000
Порошок НЖЛ-1, легированный Al и B	10 800-11 000	До 1,0	80-90	–
Порошок НХ16С3Р4	5 500	0,3	80-50	–
Порошок ПН70Ю30	5 000-6 000	1,0	Не менее 60	–
Порошковая смесь Ti; Cr; B	10 000-12 000	1,0-1,5	50-60	–

Используют порошки с размером частиц, мкм: 40-100 для газопламенного и плазменного напыления; до 200 для газопорошковой наплавки; 20-60 для детонационного напыления. Гранулированные порошки марок ПГ-10Н-01, ПГ-10Н-04 и ПГ-10К-01 применяют для порошковой наплавки; высоколегированную порошковую смесь ПС-12НВК-01, гранулированные порошки ПГ-12Н-01 и ПН-12Н-02 – для газотермического напыления с последующим оплавлением; ПГ-19М-01 и термореагирующие композиционные порошки ПТ-НА-01 и ПТ-19Н-01 – для газотермического напыления без последующего оплавления, изготовляют методом конгломерирования. Характеристики порошков приведены в табл. 40.

40. Химический состав напыляемых детонационным способом порошков и твердость покрытий

Марка порошка	Содержание компонентов, % (мас. доля)						Твердость покрытий HRC
	Cr	B	Si	Fe	C	Ni	
ПГ-10Н-01	14-20	2,8-4,2	4,0-4,5	3-7	0,6-1,0	Остальное	55-62
ПГ-10Н-04	-	1,2-1,8	2,3-2,8	До 2	До 0,2	То же	230 НВ
ПГ-10К-01	21-25	1,2-1,8	0,8-1,3	До 2	1,3-1,7	28-32	45-50
ПН-12Н-01	8-14	1,7-2,8	1,2-3,2	2-5	0,3-0,6	Остальное	35-44
ПГ-12Н-02	10-16	2-4	3-5	3-6	0,4-0,8	То же	45-54
ПГ-19М-01	-	-	-	До 4	-	-	65-72
ПТ-НА-01	-	-	-	-	-	Остальное	-
ПТ-19Н-01	8-14	1,7-2,8	1,2-3,2	2-5	0,3-0,6	То же	28-40

Примечания: 1. В состав порошков входят также следующие компоненты, % (мас. доля): ПГ-19М-01: вольфрам 8,5-10,5; остальное – медь; ПГ-10К-01: вольфрам 3,5-4,5; ПТ-НА-01: алюминий 4,5-5,5; ПТ-19Н-01: алюминий 0,8-1,3%.

2. Обозначения в марках: ПГ – порошок гранулированный, ПН – порошок напыляемый (для газотермического напыления с последующим оплавлением), ПТ – порошок терморегулирующий композиционный.

Сплавы и порошки металлидов для нанесения покрытий газотермическим напылением изготовляют способом совместного восстановления оксидов металлов гидридом кальция или распылением расплава. Характеристики этих сплавов и порошков приведены в табл. 41 и 42.

Основу приведенных в табл. 41 порошков и самофлюсующихся сплавов составляют никель и титан. К примесям относятся сера, фосфор и кислород; их содержание должно быть соответственно не более 0,04; 0,04 и 0,05% (мас. доля). Порошки наносят на детали машин для упрочнения и восстановления поверхностей всеми способами напыления. Оплавление нанесенных покрытий, а также свободно насыпанных порошков может производиться газопламенным способом, ТВЧ, лазерным лучом и другими источниками тепла. Покрытия отличаются высокой стойкостью к износу и коррозии. Детали с покрытиями используют в условиях ударных нагрузок, в агрессивных средах, с абразивным износом при температуре до 600 °С. Целесообразно применять порошки при восстановлении и упрочнении клапанов, распределительных валов двигателей внутреннего сгорания, лопаток и роторов, вентиляторов, валов и втулок гидронасосов, деталей сельскохозяйственных и других машин.

В условиях ударно-абразивного изнашивания никелевые сплавы, нанесенные газотермическим напылением, по износостойкости не могут конкурировать со сплавами на основе железа, и поэтому в подобных условиях наносят покры-

41. Химический состав напыляемых газотермическим способом титаноникелевых сплавов

Марка стали	Основные компоненты			Примеси (не более)				Твердость HRC напыленного слоя
	Ni	Ti	Al	Fe	C	Ca	N_2	
	% (мас. доля)							
ПН-70Ю30	Основа	-	28-33	0,2	0,07	0,15	0,08	40
ПН-85Ю15			12-15					-
ПН-55Т45		43-47	-			0,3	0,1	55-60
ПТ-88Н12	10-12,5	Основа				0,15		-
ПТ-65Ю35	-		35,5-40				0,08	
ПР-Н70Ю30	Основа	-	28-33	2,0		0,1		
ПР-П85Ю15			12-15	1,0				

42. Химический состав порошков для газотермического напыления

Марка порошка	Содержание основных компонентов, % (мас. доля)					
	C	Cr	Si	B	Mn	Fe
ПР-Н80Х13С2Р	0,2-0,4	12-14	2,0-2,8	1,2-1,8	-	
ПР-Н77Х15С3Р2	0,35-0,6	14-16	2,8-3,5	1,8-2,3	-	
ПР-Н73Х16С3Р3	0,6-0,9	15-17	2,7-3,7	2,3-3,0	-	До 5
ПР-Н70Х17С4Р4	0,8-1,2	16-18	3,8-4,5	3,1-4,0	-	
ПР-Н67Х18С5Р4	0,9-1,5	16-19	4,0-5,0	40-4,7	До 1	
ПР-Н65Х25С3Р3	0,9-1,5	23,5-26,5	2,1-3,3	2,0-3,0	0,05-0,35	
ПР-Н68Х21С5Р	0,35-0,5	20-22	4-5	1,0-1,3	-	4-7

тия из порошков на основе железа. Первые пять видов порошков (см. табл. 42) по свойствам соответствуют сталям типа Х18Н9, Х17, Х13. Они обеспечивают твердость покрытий до 55 HRC. Их применяют для напыления износо- и коррозионно-стойких покрытий взамен самофлюсующихся хромоникелевых сплавов. Порошок марки ПР-0Х18Н9Т используют для нанесения коррозионно-стойких покрытий. Порошок марки ПР-Х23Н28М3Д3Т целесообразен взамен самофлюсующихся хромоникелевых сплавов для нанесения износостойких покрытий.

Упрочнение методами электроискровой обработки

Электроискровую обработку применяют для повышения износостойкости и твердости поверхности деталей машин, работающих в условиях повышенных температур в инертных газах; жаростойкости и коррозионной стойкости поверхности; долговечности (режущей способности) металлорежущего, деревообрабатывающего, слесарного и другого инструмента; создания шероховатости (на поверхности) под последующее гальваническое покрытие; облегчения условий проведения процесса пайки обычным припоем труднопаяемых материалов (нанесение промежуточного слоя, например, меди); увеличения размеров изношенных деталей машин при ремонте; изменения свойств поверхностей изделий из цветных металлов. Благодаря такой обработке создается возможность значительно изменять исходные физические и химические свойства поверхностного слоя (твердость, износостойкость, жаростойкость и др.) как быстрорежущей, так и других инструментальных сталей. Электроискровая обработка заключается в легировании поверхностного слоя металла изделия (катода) материалом электрода (анода) при искровом разряде в воздушной среде (рис. 39).

В результате химических реакций легирующего металла с диссоциированным атомарным азотом и углеродом воздуха, а также с материалом детали в поверхностных слоях образуются закалочные структуры и сложные химические соединения (высокодисперсные нитриды, карбонитриды и карбиды), возникает диффузионный износостойкий упрочненный слой.

Упрочненный слой имеет высокие износостойкость и твердость (измеренная методом Виккерса на приборе ПМТ-3 твердость составляет 1000-1400 HV и зависит от материала электрода). Общий слой упрочненного металла после электроискровой обработки состоит из верхнего белого нетравящегося и нижнего переходного диффузионного слоев с переменной концентрацией в нем легирующих примесей и карбида, с сильно измененной исходной структурой, постепенно переходящей в структуру основного металла. В большинстве случаев нижний слой по глубине несколько больше верхнего. Благодаря наличию диффузионного слоя в структуре упрочненного металла возможно многослойное упрочнение, в том чис-

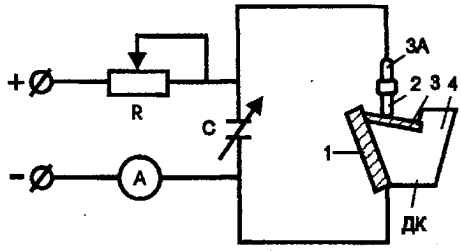


Рис. 39. Принципиальная электрическая схема устройства для электроискровой обработки: ЭА – электрод – анод; ДК – деталь – катод на контактной пластине; 1 – графитовая пластинка; 2 – упрочняющий электрод; 3 – упрочняемая поверхность; 4 – корпус инструмента

ле с образованием разнолегированных слоев. Последующее воздействие лазерным излучением улучшает свойства упрочненной поверхности, легированной электроискровым методом, снижает степень ее шероховатости.

Электроискровому упрочнению подвергают поверхности: деталей машин типа кулачков, направляющих, фиксаторов, прижимов, толкателей, клиньев; шпоночных пазов, шлицев; отверстия корпусных деталей, изготовленных из конструкционных легированных и углеродистых сталей; инструментов и технологической оснастки.

	Марки стали
Резцы, сверла диаметром более 5 мм, зенкеры, развертки, фрезы, протяжки	Р18, Р9, Р6М5, Р18Ф2, Р18К5Ф2, Р5К5, Р9К10, Р10К5Ф5
Штампы для холодной и горячей штамповки, гибочные, вытяжные	У8, У10, У12, ХВГ, 5ХНМ, 5ХВ2С, Х12Ф1, Х12М, ХВ5
Подающие и зажимные цанги, оправки, вкладыши, кондукторные втулки, втулки направляющих колонок	65Г, 60Г, 60С2А

В инструментах упрочняют следующие поверхности:

Инструмент	Упрочняемая поверхность
Резцы:	
проходные, подрезные, отрезные, расточные, строгальные и др.	Задняя и передняя грани, главная режущая кромка, радиус закругления, проходные и вспомогательные кромки
фасонные	Передняя грань
Спиральные сверла	Задняя грань и перемычка, переходные уголки на передней грани
Зенкеры	Задняя грань и заборная часть
Фрезы с зубьями:	
простыми	Задняя грань
затылованными	Передняя грань
Круглые протяжки	Задняя поверхность на режущих зубцах
Зубонарезные долбяки	Передняя грань
Штампы	Рабочие грани

Инструмент, подлежащий последующим переточкам по задним поверхностям (резцы токарные и фасонные, сверла, фрезы шпоночные и концевые и др.), подвергают упрочнению после каждой переточки. Вспомогательный и штамповый инструмент, изготовленный из инструментальных и конструкционных сталей, упрочняют после окончательной подготовки к эксплуатации. В цангах и вкладышах к цангам упрочняют поверхности рабочих отверстий на длине не менее 30 мм от торца; в направляющих шпоночных протяжках – опорную поверхность направляющего паза по ширине и длине; в копирах гидрокопировальных станков – обкатываемую поверхность копира; в упорных центрах и полуцентрах – центры упорные с конусом Морзе 3-6 после шлифования рабочего конуса и последующих перешлифовок; поверхность рабочего конуса на 1/3 длины образующей от вершины конуса. После упрочнения поверхность рабочего конуса подвергают доводочному шлифованию (припуск 0,01-0,015 мм). В матрицах и пуансонах разделительных и формоизменяющих штампов упрочняют рабочие поверхности матриц и пуансонов, по которым в процессе эксплуатации происходит наибольшее изнашивание.

Технологические рекомендации для выполнения электроискрового упрочнения. Детали, инструменты и технологическую оснастку перед электроискровым упрочнением предварительно подготовляют: режущий инструмент затачивают, удаляют грязь, пыль, продукты коррозии и заусенцы с упрочняемых поверхностей и кромок деталей. Параметр шероховатости упрочняемой поверхности *Rz* не должен превышать 80 мкм. Перед началом работы вибратор и аппарат регулируют в соответствии с принятыми режимами обработки. После включения аппарата электроды вводят в соприкосновение друг с другом и затем перемещают упрочняющий электрод относительно упрочняемой поверхности, поддерживая постоянным давление на вибратор.

По обрабатываемой поверхности электрод перемещается, выполняя либо круговые движения по небольшому кругу с одновременным продвижением в сторону, либо зигзагообразные движения с небольшой амплитудой и продвижением в сторону.

При выполнении операции следует как можно реже отрывать упрочняющий электрод и прерывать плавное его перемещение вдоль упрочняемой поверхности. Отрыв электрода вызывает разряд конденсатора контура. Если упрочняющий электрод был отведен от упрочняющей поверхности на некоторое расстояние, а затем вновь приближен к ней, то первый разряд между вновь сближенными электродами возникает в ионизированном воздухе при разности потенциалов, близкой к напряжению источника питания зарядного контура. Такой разряд может вызвать значительную эрозию поверхности упрочняемого изделия или даже прижог на ней.

При упрочнении режущего инструмента, изготовленного из быстрорежущей стали или ее заменителей, можно допустить на смежной грани наличие первого из цветов побежалости – светло-желтого. При электроискровом упрочнении инструмента и штампов, изготовленных из углеродистой стали, режимы и технология упрочнения должны обеспечивать полное отсутствие цветов побежалости на смежных гранях.

Смазывание упрочняемых поверхностей маслом приводит к увеличению их шероховатости. Искровой разряд в жидкой среде приводит к увеличению выброса металла с поверхности электродов. При этом тепловое воздействие не успевает распространиться на большую глубину, вследствие чего толщина упрочненного слоя не увеличивается. Шероховатость и сплошность нанесенного покрытия зависят от степени шероховатости исходной поверхности; чем ниже исходная шероховатость, тем выше качество поверхности с нанесенным покрытием.

После упрочнения инструмента рекомендуется выглаживать его поверхность алмазными кругами, шлифовальной шкуркой или доводить поверхности электродом из электрографита ЭГ-4. В точном инструменте достаточно упрочнить только передние грани вдоль режущей кромки и ленточки.

Упрочнение металлорежущего инструмента рекомендуется начинать с передних граней режущей кромки и ленточки, а затем упрочнять задние грани, что обеспечивает высокое покрытие и уменьшит опасность возникновения коротких замыканий.

Упрочнение инструментов, используемых для предварительной обработки резанием деталей, к размерам которых не предъявляется особых требований по точности, можно проводить на высокопроизводительных жестких режимах обработки. Электроискровому упрочнению подвергают грани инструмента шириной

около 3 мм (для штампов – более 5 мм). Чтобы не повредить режущие кромки при упрочнении, рекомендуется их защищать графитовыми пластинами, прижимаемыми к смежным граням. Рекомендации по выбору режима электроискрового упрочнения приведены в табл. 43.

Электроискровое упрочнение проводят на мягких, средних и жестких режимах по току в сети и напряжению на электродах. Мягкие режимы обеспечивают получение тонкого мелкодисперсного плотного слоя упрочняющего металла. Для образования упрочненного слоя при работе на мягких режимах требуется больше времени, чем при использовании жестких режимов. Жесткие режимы позволяют получить более толстые слои упрочняющего металла, однако не обеспечивают его однородности, плотности и мелкодисперсности. Режимы электроискрового упрочнения на установке типа ЭФИ-46А приведены в табл. 44.

Электроискровое упрочнение осуществляют вибрирующим электродом вручную. Основным недостатком упрочнения при ручном способе перемещения электрода является неустойчивость и зависимость результатов упрочнения от квалификации и навыков рабочего. Кроме того, ручная работа малопроизводительна.

Скорость перемещения электрода при ручной обработке не должна превышать 0,07-0,09 м/мин. При более высокой скорости качество покрытия снижается. Следует соблюдать перпендикулярность расположения электрода по отношению к упрочняемой поверхности. Установки с ручными вибраторами не позволяют полностью реализовать все преимущества процесса. Для механизации процесса можно использовать механизмы перемещения рабочих столов и суппортов металлорежущих станков.

При *электроискровом легировании* в результате термического воздействия разряда наблюдается значительный рост зерен в поверхностном слое основного металла, что приводит к уменьшению его прочности. Нагрев тонких поверхностных слоев основного металла, примыкающих к износостойкому покрытию, сопровождающийся одновременным интенсивным отводом теплоты от металла холодного изделия, вызывает образование микротрещин в поверхностных слоях. Трещинообразование тем значительнее, чем ниже прочность поверхностных слоев основы. Это ухудшает сцепление наносимого слоя с основным металлом.

Разработан способ улучшения контакта наносимого износостойкого покрытия с основным металлом [а. с. 833424 (СССР)], в соответствии с которым перед электроискровым легированием изделие подвергают воздействию ультразвука, а затем выполняют рекристаллизационный отжиг. Его можно совместить с процессом нагрева изделия под закалку.

Эффект достигается в результате воздействия ультразвука на дислокационную структуру кристаллической решетки металла. При поглощении акустической энергии происходит рост плотности дислокации, активация малоподвижных дислокаций, разориентация субзерен и разрушение субграниц, образование ячеистой структуры, двойникование и образование других структурных несовершенств. При последующем рекристаллизационном отжиге в металле с высокой плотностью структурных несовершенств скорость образования зародышей больше, чем скорость их роста. Это предопределяет образование мелкого зерна при рекристаллизации и сохранение его в конечной структуре после закалки.

Образование двойников, по границам которых при нагреве выделяются мелкодисперсные карбиды, повышает допустимый уровень перегрева аустенита.

43. Режимы электроискрового упрочнения технологической оснастки

Инструмент	Марка инструментальной стали	Электрод			Режим обработки		Упрочняемая поверхность		
		Материал	Марка	Диаметр, мм	Ток короткого замыкания, $I_{к.з}$, А	Рабочий ток, $I_р$, А	Толщина нанесения слоя, мм	Сплошность покрытия, % площади	Параметр шероховатости Ra, мкм
Резцы, сверла, зенкеры, фрезы, развертки, протяжки	Р18. Р9, Р6М5	Угли спектральные	В-3	4	3,6-4,4	1,2-1,5	0,001	80	2,5
		Графит	ЭГ-2, ЭГ-3						
		Твердый сплав	ВК-2, ВК-3	3					
Штампы,	У8, У8А, У10, У10А, У12, ХВГ, 5ХНМ	Феррохром	ФХ100Н	4	3,9-4,7	2,0-2,5	0,1	80	2,5
		Твердый сплав	ВК-8 Т15К6						
Подающие и зажимные цанги, вкладыши, кондукторные втулки, втулки направляющих колонок	65Г, 60Г, 60С2А	Феррохром	ФХ100Н	4	3,6-4,4	1,2-1,5	0,01	70	2,5
		Твердый сплав	Т15К6						

44. Режимы электроискрового упрочнения, проводимого на установке ЭФИ-46А

Режим	Напряжение на электродах, В		Сила тока, А		Время τ обработки 1 см² поверхности, мин
	Вспомогательный ход	Рабочее	Короткого замыкания	Рабочий	
Мягкий	15 25	9-13 10-18	3,5 3,7	0,8-1,2 1,2-1,5	4,0-16,0 3,0-8,0
Средний	40 75	21-33 30-48	4,5 4,3	1,5-2,0 2,0-2,5	2,0-8,0 2,0-7,0
Жесткий	135 190	35-58 48-68	4,2 5,5	2,0-2,5 2,2-2,8	1,0-6,0 0,5-5,0
Режим	Количество (мг) сплава Т15К6, перенесенного на 1 см² за время τ, не менее	Продолжительность процесса, с/мм²	Удельный расход (г/см²) материала электродов *		
			Феррохрома	Сплава Т15К6	Титана
Мягкий	3,0 3,9	1,5 1,3	0,009 0,030	0,006 0,025	0,002 0,010
Средний	8,0 15,0	1,2 1,1	0,050 0,070	0,045 0,060	0,024 0,036
Жесткий	12,0 9,0	1,0 0,7	0,085 0,110	0,080 0,100	- -

* Расход Q материала электрода определяют по формуле $Q = F\lambda$, где F = площадь упрочнения, см².

Примечание. Напряжение в сети 220 В.

В результате увеличивается прочность материала основы, и при последующем электроискровом легировании уменьшается возможность трещинообразования поверхностных слоев основы, улучшается сцепление с наносимым слоем.

Пример. Матрицу обрезного штампа изготовляют из стали 5ХВ2С. После механической обработки материал изделия подвергают воздействию ультразвука с амплитудой колебаний 0,00065 мм и частотой 80 кГц. Рекристаллизационный отжиг проводят при 690 °С, выдерживают в течение 70 мин и затем нагревают под закалку до 880 °С. После закалки в масле изделие отпускают при 260 °С до твердости 50-52 HRC.

Электроискровое легирование выполняют на установке ЭФИ-46А по режиму: рабочее напряжение 50 В, сила рабочего тока 2,3 А, толщина наносимого слоя 0,1-0,15 мм. Поверхностное пластическое деформирование проводят накаткой роликом с усилием 1,5 кН.

Электроды для электроискрового упрочнения. Максимальная глубина и высокая твердость упрочненного слоя создаются при использовании электродов на хромовой основе (феррохромовых, хромомарганцевых) и из чистого хрома. В случае применения твердосплавных или металлических электродов поверхностный слой получается твердый, износостойкий, но большой толщины (до 0,12 мм), в результате чего увеличиваются размеры изделия. При использовании электродов из графита не происходит увеличение габаритных размеров изделия,

сохраняется исходная шероховатость упрочняемой поверхности, но не обеспечивается выполнение повышенных требований к твердости и износостойкости упрочненного слоя, образуемого в результате одновременного науглероживания и закалки. Рекомендации по выбору материалов электрода приведены в табл. 45. При отсутствии пластинок требуемых форм и размеров, а также для более полного использования твердого сплава можно применять электроды, изготовленные напайкой или приваркой твердосплавных пластинок к стальной державке.

Рабочая часть электрода должна иметь форму конуса или пирамиды с затуплением вершины радиусом 1,6-2,0 мм, что способствует получению качественной поверхности упрочненного слоя.

Упрочнение методами ионно-плазменной обработки

Ионно-плазменную обработку применяют для повышения износостойкости инструментов, рабочих элементов штампов, пресс-форм, приспособлений, а также ответственных стальных деталей машин, работающих в условиях адгезионного и диффузионного изнашивания при высоких температурах окружающей среды; выполняют преимущественно в вакуумных установках. Вещество осаждаемого металла в вакууме последовательно превращают в газ, пар, ионизированный пар и плазму и осаждают в атмосфере реакционного или нейтрального газа в виде конденсата на упрочняемую поверхность.

Покрытие получают термическим испарением, катодным или ионно-плазменным распылением или бомбардировкой поверхности ионами осаждаемого вещества. В качестве реакционного газа используют азот или углеводород. Соответственно покрытие состоит из нитридных или карбидных соединений

45. Рекомендуемые упрочняющие электроды для нанесения покрытий на различные изделия

Упрочняемые изделия	Материал упрочняющего электрода и его марка	Эксплуатационные особенности электродов
Развертки, зенкеры, сверла, протяжки, фрезы и другой режущий инструмент	Графиты ЭГ-2 и ЭГ-4	Сохраняет заданные чертежом размеры и шероховатость поверхности инструмента
	Твердые сплавы ВК-2 и ВК-3	После упрочнения требует доводочного шлифования
Пуансоны, матрицы, кондукторные втулки, втулки наплавляющих колонок, адаптеры протяжных станков	Твердые сплавы ВК-3, ВК-8, Т15К6, Т60К6 и Т30К4	Возможно многократное восстановление с последующим шлифованием
Инструмент и детали машин, работающие в условиях высоких контактных напряжений и абразивного изнашивания	Твердый сплав Т15К6, хром Хр5 и Хр6, белый чугун	
Подающие и зажимные цанги, детали типа вал-подшипник	Литой карбид вольфрама	
Измерительные инструменты, детали с повышенными требованиями точности	Графит ЭГ-2, ЭГ-3, ЭГ-4, ЭГ-6	Сохраняет первоначальные геометрические размеры и форму обработанной поверхности

тугоплавких металлов. Способ термического испарения можно осуществить в безокислительной атмосфере нейтральных газов или в воздушной среде. Существенное отличие методов состоит в различном качестве создаваемой плазмы; наличии в плазме нейтральной или заряженной ионизированной составляющей.

Основные факторы, определяющие работоспособность покрытий, – свойства материала основы, обеспечивающего прочность, сопротивление тепловому удару и деформации; качество подготовки поверхности, сцепление между покрытием и основой; качество материала покрытия. Самыми распространенными материалами покрытия являются карбид титана TiC, нитрид титана TiN и оксид алюминия Al_2O_3. Большое значение для работоспособности покрытия имеет его толщина. Слишком тонкое покрытие плохо сопротивляется изнашиванию, слишком толстое может скалываться.

Химическое осаждение покрытия из газовой фазы при термическом испарении. На пластинки из твердых сплавов из газообразной смеси бензола, хлорида титана, аргона и водорода химически осаждают слой TiC. Параметры осаждения: скорость потока смеси 55-70 л/мин; температуры пластин 1030-1060 °С, смеси 900-1100 °С. Наибольшей износостойкостью обладает слой TiC толщиной 4-8 мм. Слой толщиной менее 2 мкм быстро изнашивается. Износостойкость слоя толщиной более 8 мкм уменьшается при дальнейшем увеличении толщины слоя.

Твердые покрытия толщиной 5-10 мкм (однослойные из TiN или TiC и двухслойные из TiN и TiC) осаждаются на поверхность деталей из газовой фазы при температуре 800-1000 °С. Твердость покрытия TiN составляет 2000 HV. TiC и TiN + TiC 3000 HV (в то время как твердого хрома 1200 HV). Покрытия наносят на детали, материалом которых являются твердые сплавы, углеродистые и легированные стали, стеллит, коррозионно-стойкая аустенитная сталь, инконель, монель-металл, нейзильбер, а также твердый хром. Применяют покрытия для повышения стойкости против изнашивания и коррозии режущих и других инструментов, коленчатых валов, деталей насосов, дизелей и др.

Для осаждения покрытий используют герметизированные камеры-печи и вакуумные установки с автоматизированным регулированием температуры. Химическое осаждение карбидов титана из смеси $TiCl_4$, водорода и углеводорода при температуре 1000 °С дает возможность получать покрытия малой толщины. Опасность отделения покрытия от основы уменьшается при толщине покрытия менее 10 мкм, если материал основы имеет другой коэффициент температурного расширения.

Нитрид титана обладает меньшей химической активностью, чем карбид титана. Двойное покрытие хорошо защищает инструмент от диффузионного изнашивания (слой покрытия из TiN) и изнашивания по задней поверхности (слой покрытия из TiC). Перспективно покрытие из оксида алюминия, которое на атомарном уровне осаждается на предварительно нанесенный на основу слой карбидов. Благодаря низкой активности оксида алюминия режущие свойства пластин могут быть значительно (до 5 раз) выше, чем у обычных твердых сплавов.

Слой Al_2O_3, препятствующий диффузии, можно наносить непосредственно на твердый сплав и затем на слой оксида – износостойкие слои TiC, TiN, TiCN. Покрытия наносят в вакуумной печи методом осаждения из газовой фазы. Режим нанесения покрытий при давлении 6,56 кПа следующий. В потоке смеси (скорость потока 40 л/мин), содержащей 92,5% H_2, 3% $AlCl_3$ и 4,5% CO_2, при 1027 °С за 15 мин осаждают слой Al_2O_3 толщиной 0,2-0,3 мкм. В печь вводят H_2 до атмосферного давления. В потоке смеси (скорость потока 80 л/мин), содержащей 88% H_2,

5% TiCl и 7% CH_4, за 150 мин осаждают слой TiC толщиной 5-6 мкм. Давление снижают до 13,3 кПа. Далее в потоке смеси (скорость потока 70 л/мин), содержащей 90% H_2, 4% $AlCl_4$ и 6% CO_2, за 120 мин осаждают слой Al_2O_3 толщиной 1,5-2 мкм. Для формирования слоев TiN и TiCN в смесь вводят N_2. Износостойкость твердосплавного инструмента с многослойными покрытиями намного выше, чем с покрытием из TiC.

В штампах с двухслойным покрытием, осажденным из карбида и нитрида титана, можно отформовать, например, 80 000-120 000 (вместо 25 000) головок винтов со шлицем. На отдельных штампах изготовляют до 180 000 винтов. Высокая твердость карбида и нитрида титана (соответственно 3000 и 2000 HV) предотвращает абразивное изнашивание штампов, а химическая инертность этих неметаллических покрытий снижает вероятность возникновения микроадгезии между обрабатываемым металлом и штампами, что уменьшает адгезионное изнашивание штампов.

Слой TiC может быть нанесен методом высокочастотного напыления в вакуумной камере с вращающейся платформой, обеспечивающей последовательное покрытие нескольких инструментов. До напыления поверхность очищают ультразвуком или струей распыленного аргона. Предварительная обработка поверхности аргоном очень важна для возникновения качественной адгезии напыленного слоя TiC с твердым сплавом основы, так как адгезия улучшает режущую способность напыленного инструмента.

Износостойкость инструмента из твердых сплавов повышают, нанося многослойное покрытие в процессе химической реакции, протекающей при температуре 850-1200 °С, в газовой фазе напыляемых компонентов. Покрытие имеет не менее трех слоев. Первый, примыкающий к поверхности, состоит из карбидов Hf или Ti, наружный из оксидов Hf, Zr или Al, промежуточный – из нитридов или оксикарбидов Hf, Zr или Ti. Если средний слой состоит из нитридов, рекомендуется между ним и слоем карбидов наносить слой карбонитридов. Толщина каждого слоя 0,5-20 мкм. При обработке резанием скорость изнашивания инструмента с трехслойным покрытием примерно в 2 раза меньше, чем у инструмента с двухслойным покрытием, и в 18 раз меньше, чем у незащищенного инструмента.

Для увеличения адгезии между износостойким покрытием и основой режущей пластины из быстрорежущей стали на поверхность пластины наносят слой чистого титана толщиной до 2 мкм, затем один или несколько слоев (толщиной 0,5-10 мкм) соединений титана типа TiC, TiN, TiCN, TiCNO и TiCO [пат. 56-25960 (Япония)].

Многослойные покрытия режущей части инструментов, состоящие из слоев различной твердости и толщины, часто не обеспечивают требуемую стойкость металлорежущего инструмента из-за хрупкости покрытия (толщина слоев в покрытии убывает к поверхности).

Увеличить прочность покрытия можно следующим способом [а. с. 607659 (СССР)]. Для повышения стойкости инструмента слои покрытия с более высокой твердостью (2600-3600 HV) чередуют со слоями, твердость которых плавно изменяется от 600-900 до 2600-3600 HV. Причем толщина твердого слоя составляет 1-3 мкм, а общая толщина покрытия не превышает 25 мкм. Такое покрытие на металлорежущем инструменте может быть получено распылением металла в вакуумной камере. Получение слоев различной твердости и плавное изменение твердости достигаются благодаря изменению параметров процесса напыления.

Слои с уменьшенной твердостью препятствуют выкрашиванию твердого слоя при работе в условиях вибрации и ударных нагрузок, так как мягкие слои деформируются и допускают тем самым некоторый прогиб твердого слоя.

Износостойкость сопрягаемых взаимно перемещающихся поверхностей можно увеличить, нанося на них покрытия, отличающиеся по своим физико-механическим свойствам, но в комплексе обеспечивающие повышение износостойкости трущейся пары, например, направляющей колонки и втулки штампа [а. с. 778873 (СССР)]. Для этого на поверхность направляющей колонки наносят пленку на основе нитрида титана толщиной 0,005-0,007 мм, на поверхность втулки – пористое твердосплавное покрытие толщиной 0,12-0,15 мм.

Пример. Направляющую колонку изготовляют из стали 38Х2МЮА и наносят на ее рабочую поверхность пленку на основе нитрида титана в процессе конденсации титана в вакууме с плотной бомбардировкой. Толщина полученной пленки составляет 0,006 мм. Направляющую втулку изготовляют из стали 20. На ее рабочую поверхность наносят детонационным способом твердосплавное покрытие толщиной 0,14 мм из порошка ВК15 с величиной зерна 15-20 мкм.

Износостойкость направляющих элементов штампов с покрытиями рабочих поверхностей, нанесенными этим способом, превышает в 18-20 раз износостойкость элементов, изготовленных из высокопрочных легированных сталей, прошедших термическую обработку, и в 4-5 раз элементов, армированных твердым сплавом. Предварительная очистка поверхности основного металла возбуждением тлеющего разряда в непосредственной близости от очищаемой поверхности часто недостаточно эффективна, особенно в высоковакуумных напылительных установках.

Для повышения качества очистки поверхности перед ее напылением [а. с. 211265 (СССР)] можно поверхность основного металла детали предварительно очистить с помощью пучка электромагнитных волн (генерируемых, например, лазером), используя эффект фотодесорбции. Способ обеспечивает более качественную очистку поверхности подложки перед началом или, в случае нанесения многослойных покрытий, непосредственно в процессе напыления. Тем самым повышают качество напыляемых пленок.

Изнашивание режущего инструмента связано главным образом с температурой рабочей поверхности. При низкой скорости резания скорость изнашивания определяется адгезионными процессами, возникающими в зоне резания. При высокой температуре возникает диффузионное проникновение, отрыв, изнашивание и истирание. Поэтому следует учесть, что покрытие TiN наиболее эффективно работает в условиях изнашивания по передней поверхности, а TiC – при изнашивании по задней поверхности.

Износостойкие покрытия из нитрида титана наносят на дисковые долбяки, червячные и дисковые резцы, осевые инструменты, изготовленные из быстрорежущей стали, а также на инструменты, оснащенные твердым сплавом.

На стандартизованные неперетачиваемые твердосплавные пластины из сплавов типа ТК целесообразно наносить равномерное покрытие нитрида титана (твердостью 2500 HV) толщиной 5-7 мкм. Стойкость твердосплавных пластин с таким покрытием возрастает в 1,5-1,8 раза при увеличении скорости резания на 25-30%. Для инструмента, изготовленного из быстрорежущих сталей типа Р18, Р9, Р6М5 и Р6М3, толщина покрытия должна быть в пределах 3-5 мкм при твердости 2600-2800 HV.

Нанесение многослойного покрытия на режущие твердосплавные пластины. Прочность и износостойкость покрытия зависят от химического состава и физико-механических свойств материала слоев. Например, двухслойное износостойкое покрытие может состоять из карбидов титана TiC (нижний слой) и боридов титана TiB_2 (верхний слой). В качестве подложки используют твердые сплавы на основа WC и Co с достаточно высокой прочностью и твердостью (до 1800 HV), которая в диффузионной зоне повышается (до 2200 HV).

На режущие пластины может быть нанесено трехслойное покрытие из TiN со следующими слоями: первый – из TiC толщиной 2-3 мкм, второй – из смеси TiC и TiN, третий – из TiN толщиной 2-3 мкм.

Многослойное покрытие из карбонитридов и карбида титана при общей толщине слоя до 10 мкм может состоять из нескольких очень тонких слоев. Наружный слой образует очень стойкий к износу и диффузии карбонитрид титана. Под этим располагается несколько промежуточных слоев из карбонитридов титана различного состава. Нижний слой из карбида титана обеспечивает прочное сцепление с основой. Наружный слой придает покрытию золотистый оттенок.

Тонкий защитный слой, наносимый на поверхность твердосплавной режущей пластины, обладает низкой теплопроводностью. Он уменьшает силу трения на поверхности контакта инструмент-стружка. Это приводит к снижению температуры рабочей поверхности и, следовательно, к уменьшению скорости диффузионного изнашивания. Кроме того, защитный слой выполняет роль барьера, препятствующего диффузии и уменьшающего схватывание металлов инструмента и стружки. Степень уменьшения скорости изнашивания зависит от свойств материала защитного слоя. Изнашивание по задней поверхности становится значительно меньше при замене защитного слоя из TiN защитным слоем из TiC. Многофазное защитное покрытие, в котором каждый отдельный тонкий слой имеет определенное назначение, обеспечивает улучшение вязкости и износостойкости режущих пластин.

Осаждение покрытий катодно-ионной бомбардировкой в вакууме выполняют для упрочнения деталей машин, технологической оснастки и инструментов, изготовленных из конструкционных и инструментальных материалов, в том числе твердых сплавов и быстрорежущих сталей, осаждая на детали из этих материалов тонкопленочные износостойкие покрытия.

Сущность способа состоит в распылении тугоплавкого металла катода, образовании ионов в низкотемпературной плазме и бомбардировке ими упрочняемой поверхности. Материал катода (напыляемый материал) испаряется в виде высокоскоростных струй (скорость испарения 1×10^6 см/с), содержащих как заряженные, так и нейтральные частицы. Струи представляют собой плазменные потоки атомов и ионов с высокой степенью ионизации.

Деталь (анод) помещают на пути плазменных потоков. На нее подают отрицательный потенциал, ускоряющий поток ионов. Выбитые из катода атомы разгоняются до высоких энергий, с большой скоростью бомбардируют поверхность анода, очищают ее, внедряются в кристаллические решетки поверхностного слоя и, накапливаясь, образуют на поверхности микропленку осаждаемого (конденсируемого) вещества.

Способ позволяет создавать износостойкие покрытия из карбидов, нитридов, оксидов, карбонитридов тугоплавких металлов (Ti, Mo, Cr, W, V и др.), а также многослойные и многосоставные (композиционные) покрытия.

Принципиальная особенность способа по сравнению с другими способами создания покрытий в вакууме (термическим испарением, катодным и ионно-плазменным распылением) в том, что в условиях электродугового разряда вещество катода превращается в потоки плазмы, и конденсат паров осаждаемых металлов образуется за счет как нейтральной, так и заряженной компонент плазмы. Процесс начинается с того, что перед осаждением покрытия поверхность детали, помещенной в вакуумированную камеру установки, очищают интенсивной бомбардировкой ее ионами осаждаемого вещества, обладающими энергией 1 кэВ и выше. Одновременно происходит нагрев детали до температуры конденсации, которая также обеспечивает высокую адгезию покрытия.

В процессе осаждения на деталь подают отрицательный потенциал 150-200 В и поддерживают необходимую температуру конденсации. Очистка и термомеханическое активирование поверхности подложки способствуют созданию адгезионной сцепляемости основы и пленки, закрытию ("залечиванию") поверхностных микротрещин и частичному упрочнению поверхности твердосплавной или стальной подложки. Для получения износостойкого покрытия в вакуумную камеру вводят реакционный газ, который, реагируя с распыленным материалом катода и осаждаясь (конденсируясь) на поверхность изделия, создает соответствующее упрочняющее покрытие в виде химического соединения (нитридов, карбидов и др.), обладающего хорошей адгезией с основным материалом. Покрытие можно наносить не только при высоких, но и при достаточно низких температурах плазмы, что расширяет диапазон упрочняемых материалов. Способ позволяет наносить покрытия на инструмент из закаленной быстрорежущей стали без применения последующей термообработки. В процессе нанесения материал покрытия приобретает новые физико-механические свойства, существенно отличающиеся от исходных.

Микротвердость покрытия можно изменять, регулируя параметры процесса, что создает возможность осаждать пленку с заранее заданными свойствами. Процесс проводят при температуре 400-600 °С, без разупрочнения подложки из твердых сплавов или быстрорежущих сталей. Параметр шероховатости *Ra* покрытия достигает 0,08-0,32 мкм, а его толщина зависит от условий работы инструмента, оснастки или детали и обычно составляет 5-20 мкм.

Способ дает возможность образовывать и осаждать слоистый конденсат, состоящий из чередующихся твердых слоев [например, из нитридов Mo либо Ti (3000-3600 HV)] и мягких [например, из чистых Mo либо Ti (600 HV)].

Покрытие из нитрида титана обладает высокой микротвердостью, пониженным коэффициентом трения, низкой химической активностью. Сочетание таких свойств приводит к снижению сил резания, уменьшению температуры в зоне резания и сокращению интенсивности изнашивания режущих инструментов. Преимущества способа в сравнении с методами химико-термической обработки – возможность получения на рабочих поверхностях покрытия с высокой микротвердостью (2600-3800 HV); более высокая (в 2-6 раз) производительность технологического процесса упрочнения; возможность проведения технологического процесса осаждения покрытия при температурах нагрева подложки, не превышающих температуру ее отпуска на высокую твердость; возможность упрочнения прецизионных режущих инструментов и деталей без дополнительной последующей размерной обработки резанием; стабильно высокая стойкость покрытия к износу, коррозии и образованию окалины.

Технологический процесс осаждения покрытия разделяют на этапы: прогрев, очистку и напыление.

Основные операции типового технологического процесса: подготовка поверхностей упрочняемой детали или инструмента (обезжиривание поверхности); загрузка детали или инструмента на позиции напыления в камеру установки; вакуумирование камеры до рабочего давления; очистка поверхности в тлеющем разряде (бомбардировка упрочняемых поверхностей тяжелыми ионами реагирующего газа); ионная бомбардировка и нагрев упрочняемой детали или инструмента; конденсация продуктов плазмохимической реакции на рабочие упрочняемые поверхности; охлаждение детали или инструмента в среде газообразного азота; выгрузка упрочняемых деталей или инструментов из установки.

Для предотвращения конденсации паров воды, удаления паров с поверхностей стенок и дегазации этих поверхностей в процессе откачки и вакуумирования осуществляют прогрев камеры горячей водой (60 °С), текущей по трубам, приваренным к стенкам рабочей камеры. Очистку поверхности подложки (анода) от загрязнений обеспечивают ионным облучением ("травлением"). Для этого напыляемой заготовке сообщают высокий отрицательный потенциал. Ионы металла катода, возникающие в результате электродугового разряда, ускоряются под действием потенциала до энергии, позволяющей выбить с поверхности изделия атомы поверхностного слоя. В режиме напыления происходит испарение материала катода (например, Ti) и обдув поверхности заготовки (анода) ионизированным паром металла катода и реакционным газом (например, азотом). В результате на поверхности изделия образуется покрытие из нитрида титана.

Глава 8
УПРОЧНЕНИЕ МЕТОДАМИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Упрочнение методами поверхностного пластического деформирования без использования внешней теплоты

Поверхностное пластическое деформирование используют для повышения сопротивления усталости и твердости поверхностного слоя металла, а также для формирования в этом слое направленных внутренних напряжений (преимущественно напряжений сжатия) и образования регламентированного рельефа микронеровностей на поверхности.

Эффективно применение упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием на финишных операциях технологического процесса изготовления деталей машин взамен операций окончательной обработки резанием лезвийным или абразивным инструментом. При обработке нежестких в сечении тонкостенных деталей наиболее пригодна динамическая обработка пластическим поверхностным деформированием инструментами ударного действия, ультразвуковое или импульсное обкатывание.

Наклеп. Пластическое деформирование, выполняемое без использования внешней теплоты для обеспечения нужного комплекса свойств поверхностного слоя, называют *наклепом*, а слой металла, в котором проявляются эти свойства, соответственно – *наклепанным*.

В результате наклепа повышаются все характеристики сопротивления металла деформации, понижается его пластичность и увеличивается твердость. Упрочнение незакаленной стали происходит в результате изменения структурных несовершенств (плотности, качества и взаимодействия дислокаций, количества вакансий и др.), дроблением блоков и созданием микронапряжений. При упрочнении закаленных сталей, помимо этого, происходит частичное превращение остаточного аустенита в мартенсит и выделение дисперсных карбидных частиц. Поверхностная деформация приводит к образованию сдвигов и упругому искажению кристаллической решетки, изменению формы и размеров зерен.

Интенсивность наклепа тем выше, чем мягче сталь. У закаленных сталей в результате поверхностного деформирования можно получить увеличение твердости более чем на 100%, а у закаленных – только на 10-15%. Прирост твердости определяется структурой деформируемой стали. Наибольшее повышение твердости наблюдается у сталей с аустенитной, ферритной и мартенситной структурами (рис. 40), наименьшее – с перлитной и сорбитной структурами. Абсолютный прирост твердости в результате наклепа составляет: для мартенситных структур 180-320 НВ; для сталей, содержащих избыточный феррит, 60-120 НВ. Значительное увеличение твердости мартенситных структур объясняется тем, что, помимо упрочнения пластическим деформированием, происходит частичное превращение аустенита в мартенсит и выделение высокодисперсных карбидных частиц.

Наклеп поверхности выполняют бомбардированием ее струей стальной или чугунной дроби и шариков, а также суспензией, содержащей абразивные частицы;

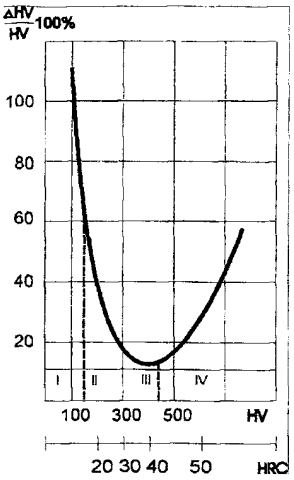


Рис. 40. Относительное увеличение твердости углеродистых и легированных сталей при пластическом деформировании в различных структурных состояниях при степени деформации $d/D = 0,5$: I – феррит и феррит + перлит; II – перлит; I – сорбит; IV – тростит и мартенсит

обкатыванием роликами, шарами или ротационным инструментом; чеканкой. Дробеструйный наклеп обеспечивает неглубокую пластическую деформацию до 0,5-0,7 мм. Применяют для обработки поверхностей небольших деталей сложных форм, а также деталей малой жесткости типа пружин, рессор, мембран и др.

Для обработки чаще всего применяют стальную дробь (реже – литую чугунную) диаметром 0,8-2 мм. Глубина наклепа при дробеструйной обработке не превышает 0,8 мм. Поверхность детали приобретает некоторую шероховатость; последующей обработке не подвергается. Режим обработки определяется скоростью подачи дроби (до 90 м/с), расходом дроби в единицу времени и экспозицией – временем, в течение которого обрабатываемая поверхность находится под ударами дроби. Режимы обработки устанавливают экспериментально. Поверхность детали должна быть полностью покрыта следами – вмятинами. Обычно экспозиция равна 0,5-2 мин на обрабатываемую поверхность.

Обкатку роликами или шариками осуществляют с помощью различных приспособлений, устанавливаемых на токарных или строгальных станках. Приспособления изготовляют одно- или многороликовыми. Давление роликов или шариков создают механическим (пружинным) или гидравлическим способом. Пружинящие элементы тарируют, что дает возможность нормировать давление на ролики. Обкатку роликами или шариками применяют при обработке деталей типа осей, валов и других деталей, имеющих форму тел вращения, реже – плоские поверхности. Устанавливают следующие параметры упрочняющей обкатки роликами: давление на ролик, форму и размеры ролика, продольную подачу и скорость обкатки.

Поверхностная твердость обрабатываемого материала и глубина пластической деформации зависят от режимов упрочнения, физико-механических свойств, структуры и химического состава материала. Наибольшее влияние на поверхностную твердость оказывает давление деформирующего элемента в месте контакта с обрабатываемой деталью и кратность приложения этого давления. Значение давления определяется силой обкатывания, геометрией деформирующего элемента и детали, а также физико-механическими свойствами обрабатываемого материала. Кратность приложения давления зависит от подачи, длины линии контакта, числа проходов и деформирующих элементов.

Соотношение между давлением (нагружением) и кратностью ее циклического приложения можно определить по формуле

$$\frac{l}{S} i \leqslant \left(\frac{\sigma_B}{kf\,HB} \right)^t,$$

где l – длина контакта инструмента с изделием в направлении подачи с учетом упругой деформации; S – подача; i – число проходов; t – показатель кривой усталости, определяемый углом наклона прямой в логарифмических координатах; $\sigma_в$ – временное сопротивление материала; r – коэффициент, характеризующий напряженное состояние и зависящий от природы материала; f – коэффициент трения; НВ – твердость по Бринеллю;

$$HB = \frac{4P}{\pi d^2}.$$

Сила, действующая на деформирующий элемент, ориентировочно определяется по формуле

$$P = 2a^2\sigma_T,$$

где $\sigma_т$ – предел текучести упрочняемого металла; a – глубина наклепа; обычно $0{,}02R_3 \leq a \leq 0{,}1R_3$; R_3 – радиус поперечного сечения упрочняемой детали.

При определенной геометрии деформирующего ролика с увеличением давления и кратности его приложения к поверхности детали *степень наклепа* возрастает примерно прямо пропорционально только до достижения давлением предельно допустимого значения. Превышение этого давления или числа циклов нагружения сопровождается остановкой роста твердости и ее снижением в связи с *перенаклепом*, т. е. разрушением поверхностного слоя металла, возникающим в результате наступившего предела пластического деформирования его кристаллической решетки. Соотношение нагружающей силы и числа циклов ее приложения [например, применительно к условиям обкатывания шаром поверхности стальной (сталь типа 15Х28) детали при t = 10 и $\sigma_в$ = 3,10 ГПА] приведено на графике на рис. 41. Кривая характеризует режимы, позволяющие получить мак-

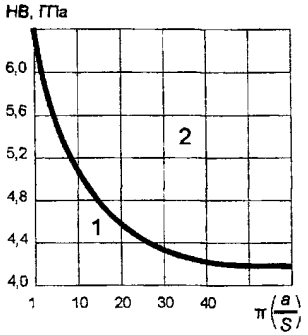


Рис. 41. График оптимальных режимов, обеспечивающих максимальную степень упрочнения: 1 – область режимов неполного наклепа; 2 – область режимов, вызывающих перенаклеп; НВ – твердость; $\tau = b\left[\frac{D-d}{2}\right]$ **– кратность приложения нагрузки**

симальную степень упрочнения (зона ниже кривой). Область, расположенная выше кривой, определяет режимы обработки, вызывающие перенаклеп.

Необходимая степень упрочнения достигается выбором одного из множества сочетаний *HB, t, S, i*. Конкретные значения указанных параметров определяют, исходя из конструктивных особенностей обрабатываемой детали, производительности процесса и т. п.

При упрочняющем обкатывании шаром степень пластической деформации $\varepsilon = d/D$, где d и D – диаметры, соответственно, лунки на поверхности и вдавливаемого шара; $\varepsilon \le 0{,}4 \div 0{,}5$; деформация более 0,5 практически не обеспечивает увеличения твердости деформируемого металла.

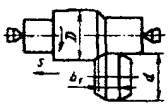
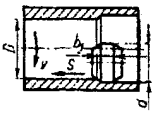
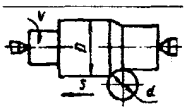
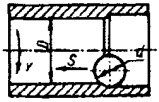
При обкатывании роликом степень деформации определяют из соотношения $\varepsilon = b/(2r)$, где b – ширина единичной канавки, возникающей как след от обкатки роликом; r – профильный радиус ролика; $\varepsilon \le 0{,}4 \div 0{,}5$.

Профильный радиус обкатывающего ролика должен быть возможно меньшим для заданной глубины наклепа. Если при обкатывании наблюдается шелушение поверхности, то размер профильного радиуса ролика увеличивают. Для упрочнения деталей малой жесткости необходимо использовать деформирующие элементы с малым профильным радиусом, что позволит получить максимальное увеличение твердости при незначительных усилиях.

При обкатывании роликами достаточно одного прохода роликов по упрочняемой поверхности. Последующие проходы не создают дополнительного наклепа и не увеличивают его глубину.

Формулы для расчета режима упрочнения методом обкатывания роликами и шариками приведены в табл. 1 и 2; рекомендуемые значения давления на обра-

1. Формулы для расчета сил пластического деформирования поверхности методами обкатывания

Инструмент	Схема обработки	Формула
Ролик		$P = \dfrac{Dd_1q^2}{0{,}126\,E(D/d+1)}$
		$P = \dfrac{Db_1q^2}{0{,}18\,E(D/d-1)}$
Шарик		$P = \left(\dfrac{dq}{0{,}045\,E}\right)^2 q$ при D/d ≥ 10
		$\left[P = \left[\dfrac{Dq}{0{,}054\,E(D/d-1)}\right]^2 q\right]$

Обозначения: P – сила обкатывания, Н; q – максимальное давление обкатывания, Па; D – диаметр обкатываемого изделия, мм; d – диаметр ролика или шарика, мм; b_1 – ширина контакта ролика с обрабатываемым изделием, мм; E – модуль упругости обрабатываемого материала, Па.

2. Формулы для расчета режимов обкатывания

Параметры	Формулы	Обозначения
Скорость v, м/мин: для станков с вращательным движением.(токарных, револьверных, расточных, сверлильных, фрезерных и др.)	$v = \frac{\pi D n}{1000}$	D – диаметр обрабатываемой детали, мм; n – частота вращения шпинделя станка, мин$^{-1}$
То же, для станков с возвратно-поступательным движением (строгальных, долбежных и др.)	$v = \frac{Ln(1+m)}{1000}$	L – длина робочего хода детали или накатного ролика (шарика) в направлении рабочего движения, мм; n – число двойных ходов, мин; m – отношение скорости рабочего хода к скорости холостого хода
Подача на один ролик (шар) при обработке многороликовыми обкатками $S_ш$, мм/об	$S_ш = S/z$	S – подача на оборот или двойной ход, мм; z – число роликов или шариков в обкатке (раскатке)

3. Давление на поверхность при упрочнении поверхностным пластическим деформированием с наклепом

Упрочняемый материал	Предварительная обработка поверхности			Давление, ГПа				
	Метод	Подача, мм/об (мм/дв. ход)	Высота неровностей, мкм	При статическом сдавливании неровностей	Поперек рисок микропрофиля	Вдоль рисок микропрофиля	Роликом	Шариком
Стали: 10, 20, 35	Обтачивание	0,45-1,1	80-320	90-130	0,70-1,1	0,40-0,75	0,80-0,11	0,75-0,10
	Растачивание	0,2-0,45	40-80	70-110	0,40-0,75	0,30-0,45	0,60-0,80	0,55-0,95
	Строгание	(До 0,2)	10-40	40-70	0,25-0,20	0,20-0,35	0,30-0,60	0,25-0,55
	Шлифование	(Грубое)	6,3-10	50-80	0,30-0,60	0,20-0,35	0,40-0,70	0,35-0,65
	Развертывание	Чистовое	До 6,3	20-50	0,22-0,40	0,20-035	0,20-0,45	0,20-0,40
45, 50Г	Обтачивание	0,45-1,1	80-320	130-160	0,75-0,10	0,35-0,70	0,12-0,14	0,11-0,13
	Растачивание	0,2-0,45	40-80	110-140	0,50-0,80	0,30-0,40	0,10-0,12	0,90-0,11
	Строгание	(До 0,2)	10-40	80-100	0,30-0,60	0.20-0,35	0,50-0,80	0,40-0,70
	Шлифование	(Грубое)	6,3-10	60-90	0,35-0,75	0,25-0,40	0,50-0,80	0,40-0,70
	Развертывание	Чистовое	До 6,3	40-60	0,25-0,40	0,25-0,40	0,35-0,50	0,30-0,40
Латунь Л-62	Обтачивание	0,45-1,1	80-320	85-120	0,70-0,100	0,45-0,75	0,80-0,11	0,75-0,115
	Растачивание	0,2-0,45	40-80	70-100	0,40-0,70	0,40-0,65	0,60-0,80	0,55-0,75
	Строгание	(До 0,2)	10-40	40-65	0,25-0,50	0,25-0,45	0,35-0,55	0,30-0,55
	Развертывание	Чистовое	До 6,3	20-45	0,20-0,40	0,20-0,35	0,20-0,45	0,20-0,40
Чугун СЧ12	Обтачивание	0,45-1,1	80-320	90-125	0,75-0,11	0,50-0,80	0,85-0,11	0,80-0,10
	Растачивание	0,2-0,45	40-80	75-110	0,45-0,75	0,45-0,70	0,60-0,80	0,55-0,80
	Строгание	(До 0,2)	10-40	45-70	0,30-0,55	0,30-0,50	0,30-0,60	0,25-0,55
	Шлифование	(Грубое)	6,3-10	45-65	0,30-0,60	0,30-0,55	0,40-0,70	0,35-0,65
	Развертывание	Чистовое	До 6,3	25-50	0,25-0,45	0,20-0,35	0,20-0,45	0,20-0,40

батываемую поверхность применительно к некоторым методам упрочнения поверхностным пластическим деформированием с наклепом – в табл. 3.

Упрочнению роликами подвергают развертки, зенкеры и фрезы, изготовленные из сталей Р18 и Р9, после термообработки и шлифования. В качестве деформирующих элементов используют ролики высокой твердости (из стали ХВ4) с прямолинейной или криволинейной образующей.

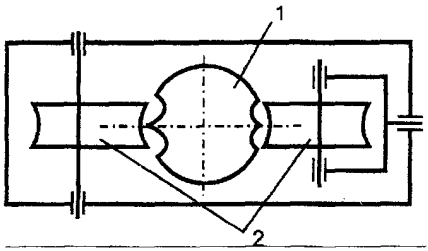


Рис. 42. Схема упрочнения режущего инструмента в самоустанавливающемся двухроликовом приспособлении: 1 – упрочняемый инструмент; 2 – ролики

Упрочняемый инструмент зажимают в центрах. Приспособление с одним или двумя (рис. 42) роликами устанавливают на резцедержателе токарного станка. Поворот инструмента на шаг между зубьями проводят с помощью делительного приспособления. Фиксирующим устройством, расположенным на заднем центре, удерживают инструмент от проворота.

Развертки и зенкеры упрочняют по задней поверхности режущей и калибрующей частей и обратного конуса; фрезы – по задней поверхности зубьев. Оптимальным можно считать P = 750÷1000 Н при диаметре роликов 35 мм. Диаметр разверток в процессе упрочнения изменяется на 0,05-0,08 мм. Под упрочнение разверток, предназначенных для обработки отверстий с параметром шероховатости Rz = 80÷40 мкм, необходимо оставлять припуск 0,04-0,06 мм.

Время доводки развертки составляет 3-5 мин. На упрочнение развертки при использовании одноролико вого приспособления затрачивают 8-10 мин, двухроликового – 4-5 мин. Таким образом, время, затрачиваемое на доводку и упрочнение разверток, примерно одинаково, но в последнем случае повышается качество обрабатываемой поверхности и стойкость инструмента, что обусловливает экономический эффект применения метода упрочнения.

В результате упрочнения параметры шероховатости инструмента уменьшаются от Ra = 0,63 до Ra = 0,040 мкм, твердость поверхностного слоя возрастает, количество остаточного аустенита в слое значительно уменьшается.

В процессе упрочнения возникает скругление радиусом r (рис. 43) при переходе режущей части развертки в калибрующую, что является положительным

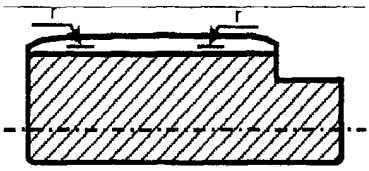


Рис. 43. Геометрия упрочненного зуба развертки в продольном сечении

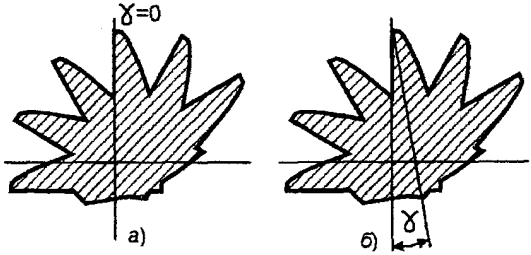


Рис. 44. Геометрия неупрочненных *(а)* и упрочненных *(б)* зубьев развертки в поперечном сечении

фактором, так как предотвращает быстрое изнашивание инструмента, изменяется геометрия его передней поверхности (рис. 44), образуется передний угол $\gamma = 8 \div 10°$, который увеличивается при возрастании силы P. Радиус скругления режущих кромок в этом случае получается несколько меньшим, чем при шлифовании, и составляет 15-20 мкм. Указанные изменения геометрии инструмента оказывают благоприятное воздействие на процесс резания.

Обработка инструмента и деталей технологической оснастки методом алмазного выглаживания. Эту операцию применяют для упрочнения изделий твердостью до 65 HRC, а также вместо операции окончательного шлифования, полирования, доводки и суперфиниширования поверхности. Метод универсален и широко применяется для обработки стальных закаленных или термически неупрочненных деталей, с поверхностными покрытиями и без них, а также деталей из цветных металлов, их сплавов, высокопрочных чугунов. Выглаживание выполняют специальными инструментами – выглаживателями, оснащенными сфероидальными, трапециевидными или конусообразными деформирующими элементами, изготовленными из синтетических сверхтвердых материалов – карбонада, гексанита-Р, эльбора-Р и других материалов, реже – из природных алмазов или твердых сплавов.

В инструментальном производстве алмазное выглаживание используют при обработке колонок и направляющих втулок штампов для холодной штамповки, пуансонов, вкладышей пресс-форм, формообразующих поверхностей вытяжных штампов, зубьев круглых деформирующих, уплотняющих протяжек, прошивок, мерительных поверхностей и калибров-пробок. Износостойкость выглаженной поверхности увеличивается в 2-3 раза по сравнению со шлифованной и на 20-40% по сравнению с полированной; износостойкость и контактная выносливость выглаженной хромированной поверхности на 35-50% выше полированной.

Гидроабразивное упрочнение. Наклеп поверхностного слоя струей суспензии (жидкость с абразивными частицами) применяют для случаев, когда необходимо получить упрочненный слой небольшой глубины. Подача абразивной суспензии к соплам установок для гидроабразивной обработки осуществляется в зависимости от конструктивных особенностей и типа установки самотеком, инжекцией сжатым воздухом или под давлением с помощью насоса.

Гидроабразивное упрочнение стальных и твердосплавных инструментов. На поверхностях и гранях твердосплавных пластин и инструментов после спекания могут образоваться специфические дефекты, из которых наиболее характерными являются рваные кромки, заусенцы (наплывы), микротрещины и микропоры, неравномерность химического состава, оксидные пятна, неравномерность распределения твердости (пятнистость), ликвация и зоны высокой концентрации металлов (например, кобальта), входящих в состав сплава в качестве наполнителя и связки и отличающихся повышенной вязкостью. По этим причинам могут возникать "вторичные" дефекты – внутренние напряжения, вспучивания, искажения геометрических форм и т. п. Дефекты снижают прочность поверхностного слоя, увеличивают силу трения, создают условия для возникновения нежелательного эффекта "схватывания" металла стружки с вязкими участками на поверхности твердого сплава. Эти участки служат очагами концентрации напряжений и центрами разрушений, преобладающей причиной поломок и преждевременного изнашивания твердого сплава при эксплуатации инструмента. На поверхностях стальных, окончательно обработанных инструментов, также имеется большинство перечисленных дефектов. Кроме того, поверхностный слой металла закален-

ного инструмента часто содержит в себе скрытые дефекты – зашлифованные прижоги, растягивающие внутренние напряжения, зоны водородного насыщения, зоны повышенной концентрации аустенитных структурных включений.

Гидроабразивная обработка поверхностных слоев инструментальных материалов позволяет ликвидировать большинство из указанных дефектов и тем самым увеличить стойкость инструментов на 25-40%. Процесс проводят либо на гидроабразивных установках, либо с помощью центробежно-планетарных машин. При обработке поверхностей абразивное воздействие оказывают гранулы, бой абразивных инструментов, фарфоровые, стеклянные или стальные закаленные шарики, кварцевый песок. Для обработки пластин твердого сплава успешно применяют абразивный порошок зеленого карборунда марки КЗ 160. Состав рабочего раствора, г/л: триэтаноламин 6-8; калий хромовокислый 9-10 или жидкое стекло 3-4; вода – остальное.

Длительность процесса обработки в центробежно-планетарных машинах 40-60 мин. Целесообразно подразделять цикл процесса на два этапа – предварительную и финишную обработки. На первом этапе (продолжительность 10-15 мин) при частоте вращения рабочей кассеты $n = 200$ мин$^{-1}$ притупляются острые кромки на ребрах и вершинах пластин, частично снимается дефектный поверхностный слой. Окончательную обработку выполняют в течение 40-50 мин при $n = 300 \div 350$ мин$^{-1}$. На этом этапе скругляются режущие кромки до радиуса 15-50 мкм, полностью снимается дефектный поверхностный слой. В процессе обработки обеспечивается создание упругих деформаций сжатия, оказывающих положительное влияние на стойкость инструмента. Процесс экономически эффективен даже при малых партиях упрочняемого инструмента.

Упрочнение чеканкой состоит в упорядоченном ударном воздействии на упрочняемую поверхность специальными бойками механизированного инструмента – пневматического, электрического или механического.

Применяют инструменты с одним бойком и многобойковые ротационные – шариковые и роликовые. Ударные бойки (шары или ролики) расположены в гнездах дисков-роторов. При их вращении в контакте с обрабатываемой поверхностью бойки поочередно наносят на нее удары, создавая эффект наклепа. *Ротационную чеканку* используют для упрочнения деталей с малой жесткостью или для обработки внутренних поверхностей.

Вибрационно-упрочняющая обработка (чеканка) является разновидностью метода чеканки деформирующими бойками. При вибрационной отделочно-упрочняющей обработке происходит многократное соударение частиц рабочей среды с деталью, вызывающее поверхностное упруго-пластическое деформирование. Операцию выполняют в среде вибрируемых стальных закаленных шаров или роликов. Применяют для получения наклепа и образования сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое металла детали с целью повышения износостойкости и сопротивления усталости.

Наибольшие значения глубины наклепа и остаточных сжимающих поверхностных напряжений достигаются при виброобработке стальными роликами. При обработке деталей с исходным параметром шероховатости поверхности более $Rz = 20$ мкм возможно ухудшение качества поверхности.

Лучших результатов достигают при обработке в среде стальных закаленных полированных шаров диаметром 2-16 мм, что позволяет значительно снизить числовые значения параметра шероховатости.

В процессе отделки и упрочнения поверхности деталей в среде закаленных тел типа шаров происходит уменьшение шероховатости поверхности, образование наклепа и сжимающих остаточных напряжений. Глубина наклепа и напряжения при этом меньше, чем при обработке поверхностей роликами. После вибрационной обработки в среде стальных закаленных шаров можно получить параметры шероховатости поверхности Ra = 0,63÷0,040 мкм. Значения параметра шероховатости поверхности зависят от исходной шероховатости и твердости материала обрабатываемой детали.

Продолжительность вибрационной обработки не должна превышать 200 мин; ее можно уменьшить, увеличивая частоту и амплитуду колебаний, изменяя характер рабочей среды и искусственно увеличивая массу детали (крепление на специальные оправки; обработка нескольких деталей, жестко связанных одна с другой). Наибольшей интенсивности процесс обработки достигает при неподвижном закреплении детали. Сила P микроудара при обработке деталей, закрепленных в вибробункере со свободно перемещающимися шарами или роликами (вибросредой), может быть определена по формуле

$$P_{\text{зак}} = \frac{m_1 v_1^2}{2} \frac{4R}{r^2} \left(1 - \frac{3}{8} K^2\right).$$

В случае свободной загрузки деталей, т. е. если детали не крепятся к корпусу вибробункера и могут свободно перемещаться в вибросреде, силу микроудара P можно рассчитать по формуле

$$P_{\text{св}} = \frac{m_1 v_1^2}{2} \frac{4R}{r^2} \left\{ \frac{5}{8} \left[1 - (1+K) \frac{m_2}{m_1 + m_2} \right]^2 + (1 - K^2) \frac{m_2}{m_1 + m_2} \right\}.$$

В формулах m_1 и m_2 – приведенная масса соответственно: частицы рабочей среды и обрабатываемой детали; v – скорость частицы рабочей среды при ударе; R – радиус частицы рабочей среды; r – радиус отпечатка на обработанной поверхности после удара частицы; K – коэффициент восстановления при ударе.

Контактные давления определяют по формуле $p = P/(\pi r^2)$; степень деформации принимают равной $\varepsilon = r/R$, где R – радиус инструмента (шара или ролика).

Режим виброупрочняющей обработки зависит от твердости и вязкости обрабатываемого металла. Например, для стали марки 40Х с увеличением ее твердости от 20 до 60 HRC степень деформации уменьшается с 5 до 0,5%; контактные давления возрастают с 0,5 до 12 ГПа (рис. 45).

Режим виброупрочняющей обработки можно определить по номограммам в зависимости от требуемой шероховатости поверхности и глубины наклепа. С учетом исходной шероховатости и твердости, характера частиц рабочей среды, частоты и амплитуды колебаний камеры, массы детали определяют продолжительность обработки.

По номограмме на рис. 46 устанавливают режим виброупрочняющей обработки, выполняемой с целью изменения шероховатости поверхности детали. На

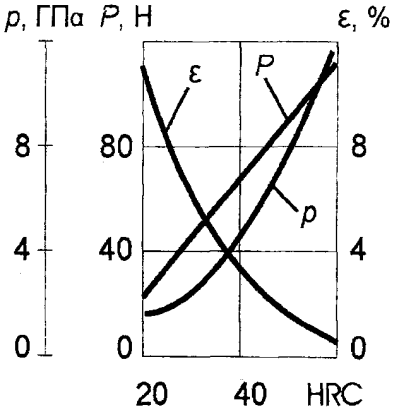


Рис. 45. Зависимость силы *P* удара, контактных давлений *p* и степени деформации ε от твердости обрабатываемой стали при вибрационной обработке

номограмме приведены данные для обработки деталей с исходными параметрами шероховатости Ra = 2,5÷0,16 мкм, однако можно обрабатывать детали и с большими параметрами шероховатости.

По номограмме на рис. 47 определяют режим обработки, осуществляемой для получения заданной глубины наклепанного слоя. Глубина наклепа зависит от твердости обрабатываемого материала. Для сталей твердостью 50-60 HRC глубина наклепа при всех условиях и режимах обработки не превышает 0,1 мм. С уменьшением твердости стали глубина наклепа увеличивается (при одинаковых условиях обработки) и при твердости 20 HRC достигает 0,3 мм. При рекомендуемых условиях обработки степень наклепа достигает 30-60%.

В номограммах приведены данные для расчета режимов виброупрочняющей обработки в среде частиц типа шариков и роликов различного размера, изготовленных из закаленной стали ШХ15 (60-65 HRC); материал обрабатываемых деталей – углеродистые и легированные стали различных структурных состояний и следующей твердости HRC: 20 (структура: феррит, феррит + перлит); 30 (перлит); 40 (сорбит); 50-60 (мартенсит, троостит). На расчетных режимах проводят виброупрочняющую обработку с постоянной промывкой 3%-ным водным раствором кальцинированной соды.

Рекомендуемая амплитуда колебаний вибробункера в вертикальной плоскости составляет 0,5-6,0 мм; диапазон частот: 8, 16, 25, 33 и 42 Гц. Нецелесообразно проводить обработку при частоте колебаний более 42 Гц, так как в этом случае нарушается нормальная работа вибрационной установки. При обработке нужно учитывать массу деталей, закреплять их неподвижно.

Порядок расчета по номограммам: по требуемой шероховатости поверхности или глубине наклепа с учетом исходной шероховатости и твердости поверхности определяют характер рабочей среды, частоту и амплитуду колебаний камеры вибрационной установки. После этого, зная массу детали, определяют продолжительность обработки на установленных режимах.

Вибрационное упрочнение твердых сплавов наиболее эффективно при выполнении варианта – *виброабразивная обработка с последующим виброупрочнением* в среде, содержащей в качестве наполнителя твердосплавные шарики; виброабразивную обработку осуществляют в абразивных средах – из порошков и боя абразивных кругов белого и хромистого электрокорунда, черного карборунда, отработавших пластин минералокерамики (например, марки ЦМ332).

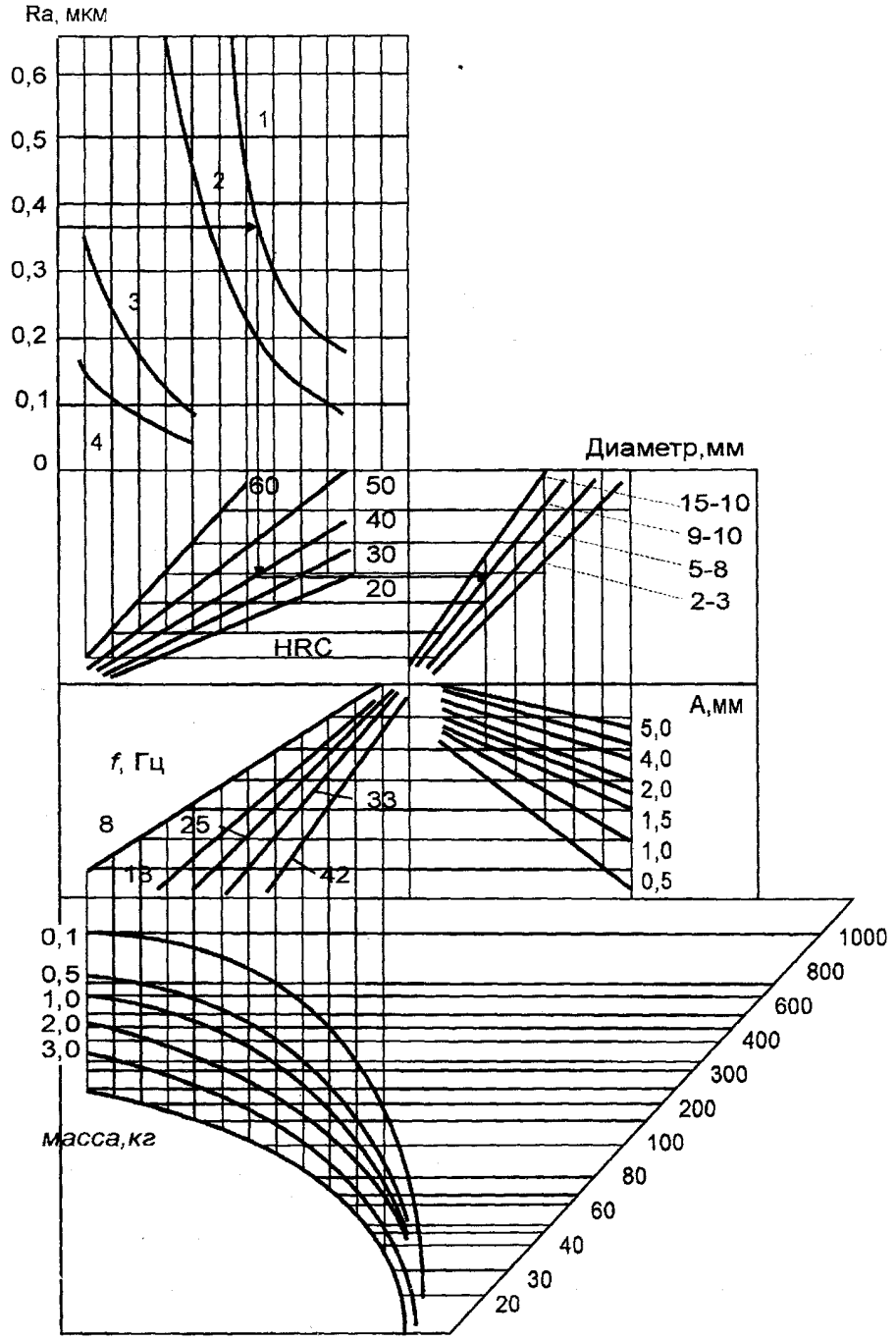


Рис. 46. Номограмма для расчета режима виброупрочняющей обработки в зависимости от требуемой шероховатости поверхности: 1– 20 HRC; 2 – 30 HRC; 3 – 40 HRC: 4 – 50 HRC; А – амплитуда колебаний

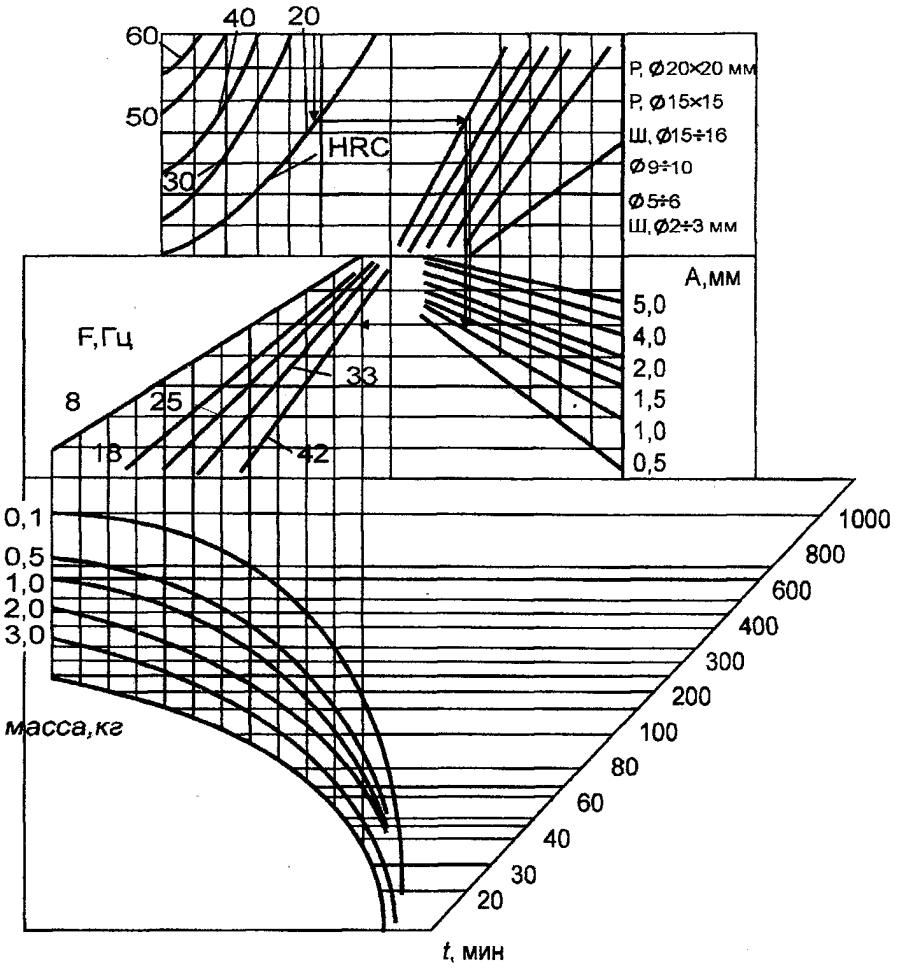


Рис. 47. Номограмма для расчета режима виброупрочняющей обработки в зависимости от глубины наклепанного слоя: Р – ролик, Ш – шарик, А – амплитуда колебаний

При виброупрочнении твердосплавных изделий несложной конфигурации форма обрабатывающих тел не оказывает существенного влияния на эффективность обработки. Использование твердосплавных цилиндрических тел дает такой же эффект, как и применение твердосплавных шариков. Производительность виброобработки, качество обработанной поверхности и эксплуатационные свойства твердосплавных изделий зависят от режимов обработки (частоты и амплитуды колебаний контейнера, продолжительности процесса) и от природы обрабатывающих сред. Виброупрочнение твердосплавных изделий выполняют при амплитуде колебаний вибробункера, равной 2-3 мм, частоте 1500 мин$^{-1}$. Время виброабразивной обработки составляет 2-3 ч [для сплавов типов ВК6, ВК8 (нижний предел) и ВК15 (верхний предел)]. Продолжительность виброупрочняющей обработки соответственно равна 3-4 и 1,5-2 ч. В результате виброобработки твердого сплава по-

вышаются его ударная вязкость, предел прочности при изгибе, твердость, снижается шероховатость поверхности. Виброупрочнение эффективно для увеличения эксплуатационной стойкости твердосплавных инструментов, особенно с механически закрепленными рабочими твердосплавными элементами – режущими пластинами, фильерами, матрицами, калибрующими кольцами протяжек и т. п.

Упрочняющая обработка поверхностей металлическими щетками проводится с использованием вращающихся металлических щеток различных конструкций, в том числе с лепестковыми рабочими элементами, иглофрезами, торцовыми щетками, лепестковыми кругами, нейлоновыми вращающимися щетками с ударными элементами в виде шайб, звездочек, пластин, скрепленных прядей троса, а также секционными и пучковыми щетками, виброторцовыми и торцовыми щетками с ударными элементами.

В качестве рабочих элементов чаще всего используют металлическую проволоку диаметром 0,2-0,8 мм, соединенную в пучки и размещенную между фланцами. *Дисковыми щетками* обрабатывают все виды поверхностей. Режимы обработки такими щетками: скорость обработки 15-45 м/с, скорость подачи (лимитируется исходным состоянием поверхности) 0,5-30 м/мин и более, натяг 0,5-5 мм. Толщина поверхностно упрочненного слоя достигает 0,05-0,1 мм. Микротвердость повышается на 20-50%. В поверхностных слоях формируются остаточные напряжения сжатия.

При контактировании рабочей части проволочного элемента щетки с поверхностью детали возможны три варианта формирования рельефа поверхности: сглаживание, царапание, микрорезание.

Сглаживание поверхности в основном происходит при мягких режимах обработки, т. е. при малой жесткости проволочных элементов, незначительном натяге, больших скоростях обработки и т. п. Притупление вершин микрорельефа обеспечивается в результате ударов проволочных элементов на линии атаки, а также их скольжения, трения по поверхности на линии контакта. Увеличение скорости обработки при прочих равных условиях сопровождается увеличением температуры поверхностного слоя и более активным ее преобразованием, наблюдаются мостики сварки, поверхность приобретает бархатистый вид.

Формирование рельефа поверхности зависит от сочетания направлений вращения инструмента и перемещения детали (инструмента). Обработка вращающимися щетками выполняется по встречной и попутной схемам. При попутной обработке направление подачи детали или перемещения щетки совпадает с направлением ее вращения, а при встречной – нет.

При *встречной обработке* рельеф поверхности формируется в основном за счет ударов, уколов, создаваемых проволочными элементами на линии атаки.

Обрабатываемая поверхность сначала подвергается воздействию на нее проволочных элементов в процессе скольжения по поверхности, а потом их ударному воздействию на линии атаки. При попутной обработке наблюдается обратное явление.

Микрорельеф поверхности при *попутной обработке* формируется в результате скольжения и трения рабочих элементов по обрабатываемой поверхности. Царапание поверхности и микрорезание выполняют при повышенной жесткости рабочих элементов щеток.

При попутной обработке щеткой с упругим креплением проволочек наибольшее влияние на качество поверхности оказывают частота вращения щетки и

диаметр ударного элемента, а при встречной обработке – натяг и масса ударного элемента; при попутной обработке щеткой со свободным соединением ударного элемента в виде толстой проволочки с корпусом щетки существенное влияние оказывает жесткость зачистных элементов и число ударных секций, а при встречной обработке – частота вращения щетки, натяг, жесткость зачистных элементов и особенно их масса.

Обработка металлической поверхности щетками сопровождается уменьшением микронеровностей; параметры обработанной поверхности зависят от исходной шероховатости, а также жесткости рабочих элементов. Чем тверже обрабатываемая поверхность, тем лучше ее обрабатываемость.

Максимальная толщина упрочненного слоя при обработке конструкционных сталей обычными вращающимися металлическими щетками не превышает 0,02-0,07 мм. При обработке заготовки из стали 14ХН3МА секционной щеткой с коэффициентом плотности набивки 0,12-0,15, натяге 4 мм, времени экспонирования 20 с толщина упрочненного слоя возрастает с увеличением скорости обработки и при υ = 38 м/с достигает 0,08 мм, повышается микротвердость поверхностного слоя на 10-30%.

При работе в режиме резания с увеличением подачи микротвердость снижается на 3-6%. Увеличение скорости обработки от 2 до 5 м/с сопровождается повышением микротвердости на 5%. Возрастание микротвердости на 10-12% наблюдается при увеличении силы прижатия от 400 до 1000 Н.

Микротвердость поверхностных слоев убывает по глубине и зависит от подачи. Уменьшение подачи сопровождается увеличением микротвердости поверхности и ее однородности. Увеличение подачи вызывает неоднородность поверхностного слоя, а следовательно, и уменьшение его твердости. Скорость вращения щетки также оказывает значительное влияние на микротвердость – ее увеличение вызывает рост микротвердости.

Повышение натяга и скорости обработки сопровождается уменьшением *Ra*. Увеличение подачи вызывает обратное явление. С учетом этих зависимостей обработку поверхностей целесообразно выполнять при скорости 15-35 м/с. Натяг не должен превышать 3 мм. Подача зависит от исходного состояния поверхности.

Длина вылета ворса (пряди), обеспечивающая минимальную шероховатость поверхности, составляет 50-75 мм, скорость обработки – 25-38 м/с. Снижение параметров шероховатости в 1,2-4 раза происходит в основном в результате сглаживания микронеровностей, образовавшихся при предшествующей обработке поверхности.

Минимальное значение Rz = 20÷40 мкм получают при скорости обработки стали 3-5 м/с и силе прижатия щетки 80-100 Н. Увеличение подачи от 100 до 400 мм/мин значительно влияет на изменение параметра Rz. Такими же соотношениями можно руководствоваться при назначении режима обработки чугуна.

Обработка заготовок из алюминиевого сплава, например АЛ7, щеткой с упругим зажимом проволочного ворса при силе прижатия 150-350 Н, $\upsilon_{щ}$ = 4÷6,5 м/с и $S_{пр}$ = 200÷1000 мм/мин обеспечивает шероховатость поверхности с параметром Rz = 10÷40 мкм.

Важнейшей технической характеристикой процесса обработки изделий вращающимися металлическими щетками, снабженными ударными элементами, является коэффициент перекрытия K:

в продольном направлении $K_{пр} = 1 - k_{пр}$;

в поперечном направлении $K_{п} = 1 - k_{п}$.

В формулах $k_{п} = S_{п}/b$ и $k_{пр} = S_{пр}/a$ – относительные величины неперекрытых размеров лунки, соответственно, в поперечном и продольном направлениях; a и b – соответственно длина и ширина лунки; $S_{п}$ и $S_{пр}$ – средний шаг между соседними лунками, соответственно, в поперечном и продольном направлениях.

Значение коэффициента перекрытия зависит от режима обработки и параметров щетки. Подачу изделия или инструмента в продольном направлении с учетом необходимого коэффициента перекрытия определяют по формуле

$$S_{пр} = S_z z K_{пр} n / 60$$

или

$$S_{пр} = \pi d S_z z\,(1 - K_{пр}) / (1000v \cdot 60),$$

где S_z – подача на одну секцию ударных элементов щетки в продольном направлении, мм; z – число секций ударных элементов щетки; v – скорость обработки, м/с; d – наружный диаметр щетки, мм; n – частота вращения, мин$^{-1}$.

Бóльшей износостойкостью обладают ударные элементы из сталей 65Г и 20Х по сравнению с ударными элементами, изготовленными из стали 45. Для ударных элементов, изготовленных из прядей стальных канатов, скрепленных сваркой, расплавом металла и другими способами, используют канаты как с металлическим, так и с органическим сердечником. Предпочтительнее использовать канаты с металлическим сердечником, так как их обезжиривание и очистка от антикоррозионного покрытия менее трудоемки. Материал проволоки стальных канатов выбирать высшей В или первой марки (группы), обладающих лучшими механическими свойствами. Направление свивки не влияет на долговечность ударных элементов.

Ударные элементы в виде шайб и звездочек изготовляют из легированной конструкционной стали 20Х, обладающей после соответствующей термообработки хорошей износостойкостью при достаточно прочной и вязкой сердцевине. Сталь 20Х цементируют на глубину 30-40% общей толщины материала с последующей закалкой и отпуском, что обеспечивает следующие механические свойства материала: $\sigma_{в} \geq 850$ МПа; $\sigma_{т} \geq 630$ МПа и $\sigma_{-1} \geq 590$ МПа. Рабочая поверхность имеет твердость 57-63 HRC, а сердцевина до 212 НВ.

Существенное влияние на долговечность щетки оказывает скорость обработки, которую можно варьировать за счет частоты вращения инструмента, внешнего диаметра щетки, а также направления движения и частоты вращения обрабатываемого изделия.

Оптимальная скорость проволочных элементов для различных типов щеток различна и зависит от их назначения: жесткие щетки (иглофрезы) работают при скорости до 10 м/с, щетки с ударными элементами – до 20 м/с, секционные – до 32 м/с, в режиме зачистки – до 40 м/с и в режиме полирования – до 45 м/с и выше.

Рекомендации по обработке поверхностей щетками

1. Для интенсификации процесса обработки щетками следует увеличить: частоту вращения щетки, скорость обработки, натяг, жесткость проволочных элементов, плотность набивки ворса, массу ударных элементов, использовать более мощные щетки, пригодные для выполнения тяжелых режимов работы.

2. Для уменьшения шероховатости поверхности необходимо: увеличить плотность набивки ворса, уменьшить диаметр проволоки, увеличить скорость обработки, уменьшить натяг и жесткость рабочих элементов, уменьшить массу ударных элементов, заменить обработку секционными щетками на обработку щетками со сплошной набивкой ворса; заменить щетку с металлическим ворсом на щетку с нейлоновым ворсом, шаржированным абразивным материалом.

3. Для полного снятия окалины, коррозионного слоя, старых лакокрасочных покрытий и т. п. необходимо увеличить: жесткость и массу рабочих элементов (при свободном креплении ворса заменить на более жесткое упругое его соединение с корпусом щетки); число секций ударных элементов; при работе секционными щетками – число секций рабочих элементов; плотность набивки ворса, скорость обработки, натяг (подачу уменьшить). В работе использовать щетку, пригодную для ведения более жестких режимов работы.

4. Если при обработке поверхности после горячей прокатки (при наличии вмятин, рисок, язвенной коррозии и т. п.) щетками типа иглофрез наблюдаются необработанные точки, устранить этот недостаток можно в результате: уменьшения жесткости щетки; замены обработки иглофрезами на обработку щетками с ударными элементами.

5. При необходимости увеличения толщины наклепа поверхности рекомендуется: увеличить скорость обработки и натяг; уменьшить подачу; увеличить массу ударных элементов; увеличить коэффициент перекрытия и число секций; при работе обычными и секционными щетками использовать отражатели.

6. Если не допускаются резкие перепады напряжений на границе обработанной и необработанной поверхности, то следует уменьшить массу ударных элементов по краям в направлении ширины щетки.

7. Для устранения следов обработки можно кроме продольной подачи создать возвратно-поступательное перемещение щетки в поперечном направлении или ее покачивание.

8. Если возникает необходимость устранения следов предыдущей обработки, то необходимо: вести обработку в поперечном направлении к следам предыдущей обработки; увеличить скорость обработки; уменьшить подачу; увеличить натяг, плотность набивки ворса, жесткость рабочих элементов; использовать щетки с элементами в виде толстой проволоки или скрепленных прядей троса; использовать секционные щетки.

9. Для увеличения производительности обработки рекомендуется: увеличить режимы обработки; использовать щетки, позволяющие вести форсированный процесс обработки; увеличить число секций у секционных щеток; увеличить жесткость рабочих элементов и плотность набивки ворса.

10. Для обеспечения нормальной работы секционной щетки без вибраций необходимо: увеличить число секций; уменьшить жесткость щетки; использовать щетку со спиральным направлением секции; секции ударных элементов следует располагать в шахматном порядке.

11. Уменьшение шума при использовании вращающихся механических щеток с упругими элементами можно достичь в результате уменьшения массы ударных элементов, замены свободного крепления ударных элементов на упругое и уменьшения скорости обработки; остальные рекомендации приведены выше.

12. Обеспечить требуемую жесткость рабочих элементов можно с помощью регулирования свободной длины ворса; подбора толщины проволочных элемен-

тов; использования элементов из высокопрочных сталей; гофрирования проволочного ворса.

Вращающимися металлическими щетками (в том числе оснащенными ударными элементами) с учетом исходного состояния поверхности выполняют следующие технологические операции по подготовке поверхности к последующему нанесению защитных либо упрочняющих покрытий:

поверхность с легким налетом ржавчины: обработку всеми способами (обычной вращающейся металлической щеткой при υ = 30 м/с, h = 2 мм, S – 1 м/мин; щетками с ударными элементами при υ = 12 м/с, h = 2 мм, S = 15 м/мин); дробеструйным способом (обработка обеспечивает хорошее качество подготовки поверхности);

поверхность с плотно прилегающей ржавчиной или прокатной окалиной: обработку обычными щетками при υ = 30 м/с, h = 4 мм, S = 0,5 м/мин (не устраняет с поверхности прокатной окалины, только заглаживает ее); обработку элементами в виде шайб и пластин при υ = 15 м/с, h = 3 мм и S = 2,5 м/мин, как и дробеструйную обработку (полностью удаляет прокатную окалину, а в виде толстой проволоки – очищает 60-80% поверхности);

поверхность с толстым слоем ржавчины, биологических отложений: обработку обычной щеткой и элементами в виде толстой проволоки (не очищает качественно поверхность); обработку элементами в виде шайб и пластин при υ = 17 м/с, h = 3 мм и S = 2 м/мин и дробеструйную обработку (обеспечивают качественную подготовку поверхности);

поверхность с остатками старых покрытий и ржавчиной: обработку обычными щетками при υ = 30 м/с, h = 3 мм, S = 1,5 м/мин (оставляет участки с плотно прилегающими остатками старых лакокрасочных покрытий); обработку ударными элементами всех типов при υ = 15 м/с, h = 3 мм и S = 5,0 м/мин и дробеструйную обработку (полностью очищают поверхность);

тонкая оксидная пленка на поверхности после холодной прокатки: обработку обычной щеткой при υ = 30 м/с, h = 3 мм и S = 1,5 м/мин, пленка с поверхности не удаляется; обработку щетками с ударными элементами: в виде толстой проволоки при υ = 25 м/с, h = 3 мм и S = 2 м/мин, в виде пластин и шайб при υ = 15 м/с, h = 3мм и S = 7 м/мин; дробеструйную обработку; последние виды обработки обеспечивают хорошее качество поверхности.

При равном качестве очистки производительность при обработке вращающимися металлическими щетками, оснащенными упругими элементами, оказывается намного (5-40 раз) выше, чем при дробеструйной обработке.

Упрочнение энергией взрыва

Энергия взрыва повышает износостойкость поверхностей изделий при истирании, их твердость, пределы прочности и текучести, статическую прочность (сварных соединений в результате сквозного наклепа сварного шва и зоны термического влияния), циклическую прочность (из-за повышения пределов прочности и текучести материала). Упрочнение при импульсных нагрузках взрывом существенно отличается от упрочнения в обычных условиях. При ударе с большой скоростью, свойственной взрыву, эффект упрочнения возрастает по мере увеличения скорости удара. В металле могут возникнуть высокие локальные температуры, вызывающие фазовые превращения в локальных участках. Одно-

временно действуют процессы, присущие упрочнению при обычных скоростях деформирования, такие, как двойниковые, сдвиги и фрагментация. Упрочнение энергией взрыва осуществляют по схемам, показанным на рис. 48, в зависимости от конструкции и назначения упрочняемого изделия.

Схему упрочнения наложением заряда взрывчатых веществ на упрочняемую поверхность применяют для упрочнения деталей большого сечения в том случае, если к ним не предъявляется высоких требований в отношении шероховатости поверхности и если существует припуск на обработку поверхности, повреждаемой взрывом. Такие детали изготовляют горячей прокаткой, литьем и горячей штамповкой (железнодорожные рельсы, звенья цепей экскаваторов, траки гусеничных машин).

Такую схему можно использовать и для упрочнения деталей большого сечения, к которым предъявляются высокие требования к точности размеров и шероховатости поверхности. В этих случаях важно определить место упрочняющей обработки в технологическом процессе, предусмотреть припуск на окончательную обработку. Припуск должен быть достаточным для устранения поверхностных дефектов, но не должен превышать толщины наклепанного слоя. При окончательной обработке резанием не допускается появления высоких температур и разупрочнения поверхности. Упрочнение по этой схеме используют для повышения износостойкости при трении, а также статической и циклической прочности.

Схему упрочнения взрывом в передающей среде применяют для упрочнения точных и высокоточных деталей, в том числе деталей сложных геометрических форм. Передающая среда защищает обрабатываемую поверхность от повреждений в результате действия взрывчатого вещества, передает импульс взрыва, воздействует на обрабатываемую поверхность, регулирует давление и время действия импульса.

Изменяя плотность и толщину слоя среды, получают различные глубину и степень наклепа материалов. Плотность среды должна быть тем большей, чем большую нужно получить глубину и степень наклепа и чем выше прочность обрабатываемого металла.

В качестве *передающих сред* используют воздух, воду и другие вещества. При использовании воды в качестве передающей среды следует иметь в виду, что в результате неполной смачиваемости на поверхности могут скапливаться мельчайшие пузырьки воздуха. Под действием высокого давления ударной вол-

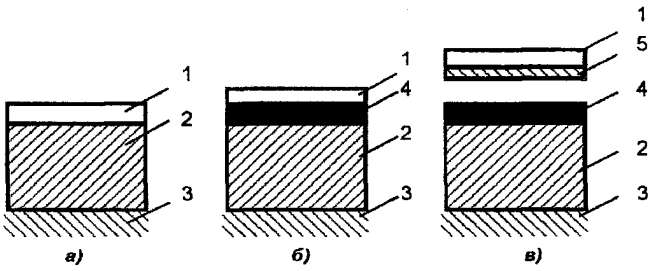


Рис. 48. Схемы процесса упрочнения с помощью взрыва: *а* – с укладыванием взрывчатого вещества на поверхность; *б* – с использованием передающей среды; *в* — с метанием пластины на поверхность; 1 – заряд; 2 – деталь; 3 – опора; 4 – среда; 5 – пластина

ны происходят микровзрывы пузырьков воздуха, что приводит к значительному повреждению поверхности. Во избежание этого обрабатываемую поверхность покрывают специальными смазочными материалами, обеспечивающими полную ее смачиваемость, или удаляют пузырьки тонкой волосяной щеткой. Стабильность результатов упрочнения во многом зависит от постоянства температуры воды, примененной в качестве передающей среды.

Технологический процесс упрочнения определяется параметрами: видом взрывчатого вещества, массой заряда, дистанцией взрыва, передающей средой и ее плотностью.

Основными *источниками энергии* при упрочнении металлов взрывом служат гексоген (флегматизированный) и тротил (прессованный и сыпучий). Иногда для получения основного заряда используют детонирующие шнуры, укладываемые соответственно форме детали. Детонирующий шнур ДШ-А – высокобризантное взрывчатое вещество, помещенное в хлопчатобумажную оплетку. Внутри сердцевины по всей длине шнура проходят направляющие нити. Сверху шнур покрыт парафиновой изоляцией. Это позволяет использовать его в воде. Детонирующий шнур создает скорость детонации не менее 6500 м/с. Шнур легко и безопасно можно резать острым ножом на деревянной доске. Из него изготовляют отрезки по 50 м и свертывают их в бухты. Основные характеристики взрывчатых веществ даны в табл. 4.

При необходимости получения малых импульсов энергии в качестве основного заряда используют электродетонаторы различных конструкций или так называемые пластические взрывчатые вещества – консистентную пасту, получаемую при смешивании твердых взрывчатых веществ с воском или парафином.

Форма заряда определяет форму ударной волны и продолжительность воздействия давления на заготовку. Для упрочнения взрывом используют заряды сферической, цилиндрической и плоской формы. Детонирующую способность заряда цилиндрической формы определяет диаметр заряда.

Инициирование заряда осуществляется с помощью специальных электродетонаторов или через промежуточный (пассивный) заряд, в качестве которого наиболее часто применяют детонирующий шнур ДШ-А.

Расчет зарядов, их подготовку, хранение, монтаж и использование для целей упрочнения металлов пластическим деформированием осуществляют в соответствии со специальными правилами.

4. Взрывчатые вещества, применяемые при упрочнении металлов

Взрывчатое вещество или устройство	Консистенция вещества или размещение устройства	Область применения
Гексоген Тротил » PENT	Флегматизированный Прессованный Порошкообразный Пластический	Основной заряд
ТЭН	В детонирующем шнуре	Основной заряд, вспомогательный заряд
Электродетонатор	-	Инициирующий заряд
Аммонит	Порошкообразный	Основной заряд

Упрочнение методами электромеханической пластической обработки

Электромеханическая пластическая обработка (ЭМПО) – способ обработки металла термомеханическим местным воздействием на поверхностный слой, при котором в процессе обработки детали через место контакта инструмента с деталью пропускают ток большой силы и низкого напряжения (рис. 49). Возникает сильный нагрев неровностей и поверхностного слоя металла, снижаются его прочность и твердость. Давлением инструмента обеспечивают деформацию и сглаживание поверхности, придают ей новые прочностные свойства.

Особенности процесса: тепловое и силовой воздействие на поверхностный слой осуществляют одновременно, а не последовательно. Нагрев при этом сопровождается действием значительных давлений. Нагрев поверхностного слоя металла происходит под действием двух источников теплоты: внешнего (теплота трения) и внутреннего (теплота, выделяемая при прохождении тока). Особенность второго источника – теплота, выделяемая им, создается одновременно и мгновенно во всем поверхностном слое; длительность нагрева и выдержки в зависимости от поверхности контакта и скорости обработки очень кратковременна (сотые и тысячные доли секунды); высокая скорость охлаждения из-за интенсивного отвода теплоты от тонкого поверхностного слоя внутрь холодной детали. В зависимости от числа проходов поверхностный слой подвергается многократным термомеханическим воздействиям.

В зависимости от степени влияния на структуру и свойства поверхностного слоя различают следующие режимы упрочнения: чистовой скоростной с малой и средней глубиной упрочнения; высокий с более значительной глубиной упрочнения.

При *высоких (интенсивных) режимах упрочнения* в поверхностном слое металла (на глубине) образуется светлая зона. В переходном слое отсутствует структура, свойственная той, что подвергалась значительной пластической деформации. Обработка на высоких режимах вызывает фазовые превращения в стали, наблюдаемые по изменениям ее структуры. Обработка на средних режимах приводит к возникновению в поверхностном слое металла однородной (темной или светлой) зоны. Нижележащий переходный слой сильно деформируется. Режим характеризуется частичным возвратом к зоне однородного поверхностного слоя. При этом если температура нагрева выше A_{C3}, то образуется светлый слой, связанный с фазовыми превращениями; если ниже A_{C3}, то образуется темный слой. Режимы упрочнения приведены в табл. 5.

Силу тока и скорость выбирают по таблице в соответствии с требованиями к глубине упрочнения. При этом следует иметь в виду, что предельные значения этих параметров рассчитаны на типовую геометрию инструмента (R = 30 мм, r = 15 мм) при обработке деталей средних диаметров (30-60 мм).

При обработке деталей сложной конфигурации или при использовании

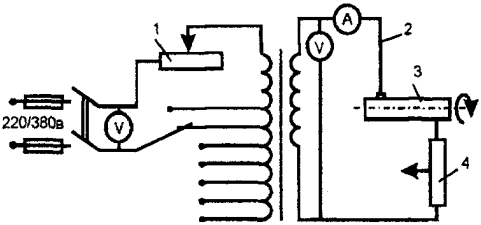


Рис. 49. Принципиальная схема устройства для электромеханической обработки: 1 – реостат; 2 – вторичная обмотка; 3 – деталь; 4 – инструмент

5. Режимы упрочнения среднеуглеродистых конструкционных сталей

Режим прочнения	Инструмент	Сила тока, А	Скорость, м/мин	Подача, мм/об	Параметр шероховатости *Ra*	Глубина упрочненного слоя, мм	Число проходов
Чистовой скоростной при глубине упрочнения: малой средней	Пластина	350-450 480-600	80-130 8-15	0,2-0,3	0,63-0,16	0,02-0,03 0,06-0,10	1-2 2-3
Высокий со значительной глубиной упрочнения	Ролик	800-1200	8-10	0,2-0,3	2,5-0,63	0,15-0,30	1-2

роликового инструмента геометрические параметры его могут значительно изменяться. В этих случаях необходим расчет площади контакта инструмента с деталью. Плотность тока для режимов, А/мм^2: первого 200-250; второго 270-320; третьего 400-600. Для больших обрабатываемых поверхностей следует выбирать меньшее значение плотности тока.

Глубину упрочнения рассчитывают по формуле

$$\delta = \frac{K\mu\left(0{,}24\eta jU + pvf/42{,}7\right)}{cvB\rho T_{\phi}},$$

где K – коэффициент, учитывающий количество поглощаемой теплоты; в зависимости от принятых режимов обработки $K = 0{,}23 \div 0{,}26$, среднее значение коэффициента при укрупненных расчетах $K_{СР} = 0{,}234$; μ – коэффициент, определяющий количество теплоты, создаваемой в зоне контакта и отводимой в упрочняемую деталь; увеличение силы тока приводит к увеличению коэффициента μ, увеличение скорости сглаживания и давления способствует его понижению; для более высоких режимов $\mu \approx 0{,}6$, для менее высоких $\mu \approx 0{,}5$; η – коэффициент, учитывающий потери во вторичной цепи трансформатора; для средних условий ЭМПО коэффициент $\eta \approx 0{,}42$; j – сила тока вторичной цепи; U – напряжение тока во вторичной цепи; $U = 2 \div 6$ В; p – нормальное давление при сглаживании; при обработке конструкционных сталей $p \approx 0{,}3 \div 0{,}5$ ГПа; v – скорость сглаживания, см/с; f – коэффициент трения; для среднеуглеродистой стали при средних условиях ЭМПО коэффициент $f = 0{,}65 \div 0{,}75$; c – удельная теплоемкость металла, Дж/(г·°С); B – ширина контакта, мм; ρ – плотность, г/см^3; T_{ϕ} – температура фазового превращения металла (точка Ac_3), °С.

На усилие электромеханического сглаживания влияют площадь поверхности контакта инструмента с изделием и физико-механические свойства поверхностного слоя. В свою очередь, поверхность контакта зависит в основном от исходной шероховатости и кривизны контактирующих поверхностей детали и инструмента. В том случае, если давление $p \le p_{расч}$ (расчетное давление), то шероховатость поверхности увеличивается; если $p > p_{расч}$, то процесс сглаживания начинает переходить в процесс высадки и появляется так называемая вторичная шероховатость.

Давление $p_{\text{расч}}$ можно рассчитать по формуле:

$$p_{\text{расч}} = \omega K_{\text{п}} \sigma_{\text{в}}' F \left(\frac{Rz}{Rz - a} \right)^m,$$

где ω – коэффициент скорости; $K_{\text{п}}$ – коэффициент пропорциональности; $\sigma'_{\text{в}}$ – предел прочности нагретого металла; F – площадь поверхности контакта; Rz – параметр шероховатости сглаживаемой поверхности; a – сближение инструмента и детали при сглаживании; m – показатель политропы сжатия. Значения коэффициента ω приведены в табл. 6.

Мощность (кВт) процесса сглаживания неровностей и упрочнения поверхности электромеханической пластической обработкой можно рассчитать по формуле, пренебрегая при этом величиной работы, совершаемой при подаче инструмента:

$$N_{\text{э}} = p_{\text{расч}} fv/(60 \cdot 120).$$

При выборе метода упрочнения электромеханической пластической обработкой и установлении режимов этой обработки учитывают состояние исходной структуры металла, его дисперсность и химический состав. Мелкозернистая структура, обладая большим сопротивлением и большей суммарной поверхностью раздела, способствует более интенсивному выделению теплоты, лучшей растворимости легирующих элементов, карбидов и нитридов, а также более глубокой прокаливаемости поверхностного слоя, отличается меньшей электрической проводимостью. По мере увеличения температуры отпуска электрическая проводимость закаленной стали повышается, что связано с понижением степени дисперсности ее структуры.

Отдельные составляющие структуры поликристаллов (например, перлит, феррит и цементит) обладают различным сопротивлением прохождению тока. Наибольшее сжатие силового потока и наиболее высокая температура возникают по границам различных включений или пор. Это обстоятельство имеет большое значение при обработке поверхностных слоев, образованных при восстановлении деталей наплавкой и металлизацией и содержащих много пор и других объемных дефектов.

Если обработку проводят на режиме, при котором отсутствуют фазовые превращения и поверхностный слой имеет темный цвет, то температуру обра-

6. Значения коэффициента ω

Скорость рабочего органа машины, м/мин	Температура обработки, °С		
	до 0,5 T	св. 0,5 T при неполной горячей деформации	св. 0,5 T при горячей деформации
16-42	1,1	1,4-2,4	1,2-1,6
42-125	1,15	2,4-3,0	1,6-2,0
Св. 160	1,25	3,5	2,5

Примечание. T – абсолютная температура плавления обрабатываемого материала.

ботки принимают ниже 0,5 $T_ф$ ($T_ф$ – температура фазовых превращений). В том случае, когда обработку проводят с фазовыми превращениями, поверхностный слой светлый, но переходный слой имеет ярко выраженную завихренность (текстурированность), температуру обработки можно принять выше 0,5 $T_ф$ при неполной горячей деформации. При наличии фазовых превращений в поверхностном слое и резком переходе к исходной структуре без заметной завихренности температура обработки должна быть выше 0,5 $T_ф$ (горячая деформация). При высоких температурах и значительных давлениях в процессе ЭМПО возможно появление растягивающих остаточных напряжений в светлом поверхностном слое обрабатываемой стали, несмотря на мартенситное строение его структуры. При умеренных температурах (ниже Ac_3) и небольших давлениях в мартенситной структуре могут появиться сжимающие остаточные напряжения.

При высокотемпературной деформации, когда температура процесса выше Ac_3, возникает горячий наклеп металла. В результате деформированные зерна приобретают мелкодисперсное строение, уплотняются и частично срастаются, диффузионно свариваются и соединяются между собой. Поверхностный слой принимает темный цвет. Такой слой металла характеризуется уменьшением начального объема и, следовательно, появлением растягивающих остаточных напряжений. Давление обрабатывающей пластины при ЭМПО создает тангенциально направленную силу трения, которая способствует вытягиванию наружных слоев металла, возникновению растягивающих остаточных напряжений. Избежать этого можно в случае применения вращающегося ролика вместо пластины.

Многократное термомеханическое воздействие на поверхностный слой стальной детали способствует созданию более мелкой, однородной и плотной структуры. При многократном воздействии, характеризующемся числом проходов инструмента по упрочняемой поверхности, показатель политропы сжатия можно рассчитать по формуле

$$m = lN/S,$$

где l – длина контакта инструмента с деталью, мм; N – число повторных ходов; S – подача, мм/об.

Твердость упрочненного поверхностного слоя зависит от числа проходов инструмента, скорости сглаживания (скорости пластического деформирования), давления на поверхность в точке (зоне) контакта, а также от физико-химических особенностей металла обрабатываемой детали. При прочих равных условиях твердость возрастает с увеличением количества углерода в стали, числа проходов инструментом и давления на инструмент. Наибольшей твердостью обладает поверхностный слой глубиной 0,02-0,1 мм. Зависимость твердости поверхностного слоя стальных деталей после упрочнения ЭМПО от перечисленных факторов приведена на рис. 50. Упрочнение ЭМПО можно выполнить жестко закрепленным инструментом или принудительно вращающимся роликом (рис. 51).

В качестве неподвижного жестко закрепленного инструмента применяют пластины или ролики твердого сплава Т15К6 с двойным радиусом скругления торца; например, R = 25÷40 мм, r = 15, где R – радиус в плане; r – радиус профиля пластины (ролика).

При одинаковых режимах ЭМПО глубина упрочненного слоя выше при сглаживании неподвижным инструментом. В этом случае имеет место трение

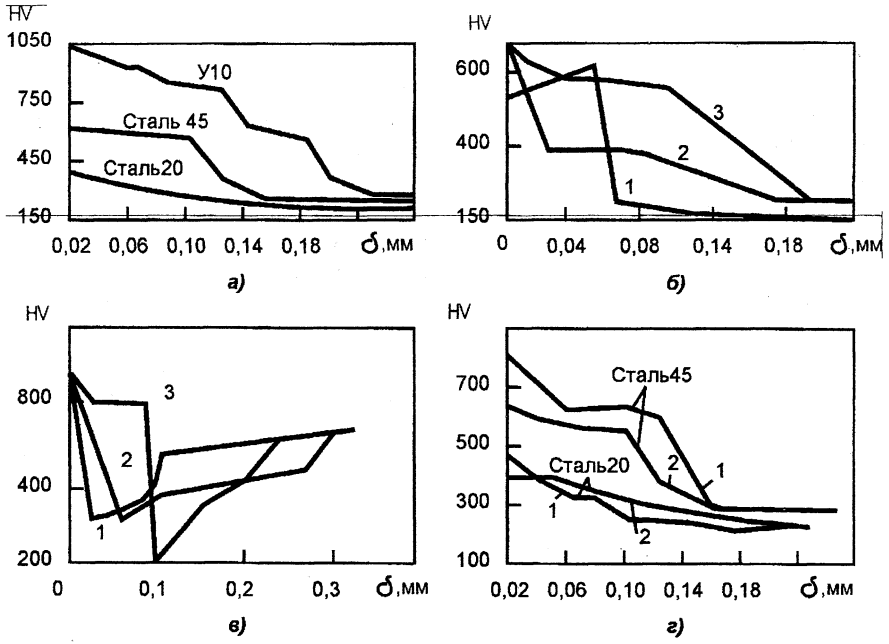


Рис. 50. Зависимость твердости поверхностного слоя от содержания углерода в стали *(а)*, числа проходов инструмента *(б)*, скорости сглаживания (скорости упрочняющей пластической деформации) *(в)* и давления на инструмент *(г)*:
***а* – *p* = 700 Па; *I* = 600 А; *υ* = 3,2 м/мин; *S* = 0,195 мм/об; *б* – сталь 40Х, 318 НВ, *I* = 710 А, *υ* = 8 м/мин, *S* = 0,2 мм/об; е – сталь 40Х, 536 НВ, *I* = 470 А, *p* = 500 Па, *S* = 0,2 мм/об; на рис. *б* и *в*; 1 – *υ* = 82,2 м/мин; 2 – *υ* = 54,1 м/мин; 3 – *υ* = 13,6 м/мин; 2 – 1 = 600 А; *υ* = 3,2 м/мин; *S* = 0,195 мм/об (1 – *p* = 100 Па; 2 – *p* = 700 Па)**

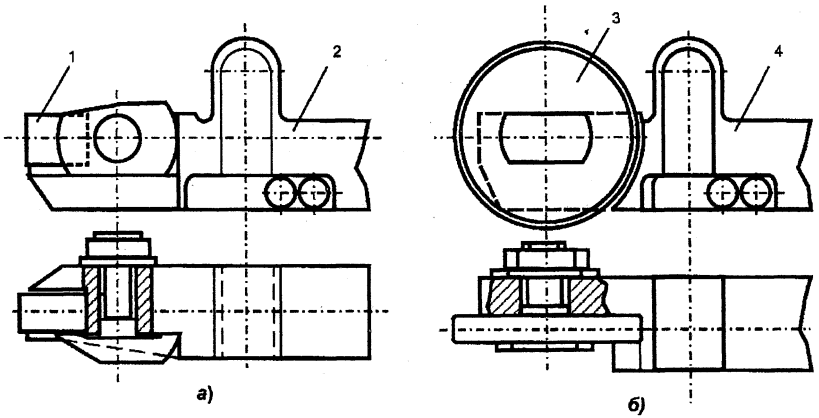


Рис. 51. Примеры конструкций деформирующих инструментов: *а* – с твердосплавной пластинкой; *б* – с твердосплавным роликом; 1 – давящая твердосплавная пластина; 2 – пружинная однопетлевая державка; 3 – давящий неподвижный твердосплавленный ролик; 4 – боковые опоры

скольжения, что приводит к образованию завихренной текстуры и более интенсивному измельчению структуры поверхностного слоя.

Детали, упрочненные неподвижным инструментом, по сравнению с деталями, упрочненными подвижным инструментом, обладают большей выносливостью и износостойкостью. При работе неподвижным инструментом, имеющим радиусный профиль, на нем быстро образуется площадка. Поэтому на радиусе нужно выполнить поясок шириной 0,5 мм, что в несколько раз увеличивает стойкость инструмента. Перед каждой очередной операцией инструмент-ролик поворачивают на угол 10-15° для обновления поверхности контакта.

К недостаткам неподвижного инструмента относится его сравнительно небольшая стойкость. Поэтому он находит применение при обработке небольших поверхностей типа шеек валов. При упрочнении валов диаметром 60-100 мм из среднеуглеродистых нормализованных сталей с параметрами шероховатости Ra = 0,63÷0,08 мкм профильный радиус ролика диаметром 45 мм может быть принят равным 15 мм. Режим обработки: сила тока I = 400÷450 А, подача S = 0,21 мм/об, сила прижатия P = 500÷700 Н.

Упрочнение колец диаметром 60-100 м, изготовленных, например, из отожженной стали 40Х, можно осуществить неподвижной пластиной из твердого сплава Т15К6 (геометрия пластины: R = 30 мм, r = 15 мм) при следующем режиме обработки: I = 400 А, v = 6,5 м/мин, S = 0,2 мм/об, P = 200 Н.

Для повышения стойкости инструмента подача при ЭМПО не должна совпадать с подачей, применявшейся при резании. Целесообразно при этом использовать охлаждение сжатым воздухом, эмульсией или любой пожаробезопасной смазочно-охлаждающей средой. Например, предварительную обточку под сглаживание выполняют при режиме резания v = 120÷130 м/мин, t = 0,3 мм, S = 0,17 мм/об резцом из сплава Т15К6, имеющим следующую геометрию: γ = 5°, α = 8°, φ = 45°, φ_1 = 30°, r = 0,5 мм. После предварительной токарной обработки параметры шероховатости поверхности соответствуют Rz = 40÷10 мкм. Поэтому последующее выполнение операции выглаживания на указанных выше режимах будет эффективным при достаточной стойкости инструмента.

При чистовой обработке нежелательно возникновение схватывания контактируемых материалов, так как это ведет к образованию нароста на твердом сплаве и резкому увеличению шероховатости поверхности. Поэтому при изготовлении деформирующего инструмента твердые сплавы типа ВК, обладающие большой склонностью к схватыванию, следует заменять сплавами типа ТК.

Преимущества вращающегося ролика: высокая стойкость, возможность упрочнения деталей на большую глубину. Вращающийся ролик применяют при обработке больших поверхностей, когда не предъявляют высоких требований к их волнистости, а также во всех случаях при обработке чугуна.

Процесс ЭМПО выполняют при постоянном токе. Источниками постоянного тока могут быть мощные низковольтные выпрямители, электромашинные преобразователи, генераторы постоянного тока, сварочные трансформаторы, трансформаторы машин для точечной и контактной сварки и др. При выборе мощности трансформатора следует учитывать продолжительность его включения. При ЭМПО она может достигать 30-50%, что неизбежно отразится на увеличении необходимой номинальной мощности.

Для многих процессов упрочнения ЭМПО, в особенности при одновременном использовании нескольких инструментов, а также при обработке крупнога-

баритных деталей требуется большая мощность источника тока. Необходимая сила тока во вторичном контуре может достигать 2000-3000 А и выше. В этих случаях наиболее подходящими являются трансформаторы для контактной сварки мощностью 25-50 кВт. Диапазон их регулирования при установлении режима процесса может быть расширен введением в первичную цепь трансформатора напряжения 220/380 В. Более плавное регулирование силы тока может быть осуществлено реостатом, который устанавливают в первичную цепь трансформатора. В генераторах постоянного тока регулирование силы тока можно производить реостатом, включенным в цепь возбуждения.

При использовании выпрямителей регулирование силы тока может быть осуществлено с помощью введенного в питающую сеть специального автотрансформатора или с помощью мощного ступенчатого реостата, включаемого последовательно в низковольтную цепь (например, от 0,015 до 2 Ом).

Упрочнение быстрорежущих и высоколегированных инструментальных сталей методом электромеханической пластической обработки. Выполняют преимущественно для поверхностей инструментов, например, сверл, фрез, разверток, зенкеров и др., изготовленных из быстрорежущих и легированных инструментальных сталей, а также инструментов для обработки давлением, например, пуансонов, матриц, ножей, изготовленных из высоколегированных инструментальных сталей.

Упрочнению подвергают закаленный, окончательно обработанный инструмент или детали. ЭМПО режущих инструментов выполняют по задним поверхностям режущих зубьев. Зубья сложнопрофильных инструментов, например, таких, как долбяки, червячные фрезы, резьбонарезные гребенки, зубострогальные резцы, упрочняют по передней поверхности. В деталях типа пуансонов, матриц и ножей упрочнению подвергают образующие и торцовые (передним и задним) поверхности. ЭМПО инструментальных (в том числе быстрорежущих) сталей позволяет создать однородную структуру поверхностного слоя металла на глубину до 0,15 мм, с микротвердостью в 1,3-1,6 раза превышающей исходную. Стойкость упрочненных этим методом режущих инструментов, например сверл, изготовленных из быстрорежущих сталей типа Р9, в среднем в 1,7-2,1 раза выше, чем у инструментов, не подвергавшихся такому упрочнению.

При установлении режима упрочнения ЭМПО инструментальных сталей нужно учесть следующие требования, предъявляемые к инструментам и вызывающие особенности в технологическом процессе этой обработки: необходимость создания в металле инструмента мелкодисперсной структуры поверхностного слоя, обладающей высокой твердостью и износостойкостью; сохранения этих свойств в процессе резания и при повторной заточке, доводке и шлифовании.

В результате ЭМПО в поверхностном слое закаленных инструментальных сталей происходят фазовые структурные превращения с образованием мелкодисперсной структуры, обладающей высокой твердостью и отличающейся высокой отражающей способностью света ("белый слой"). На основные характеристики упрочненного слоя влияют электрические, механические и временные параметры режима процесса упрочнения. С ростом силы тока возрастают микротвердость и толщина упрочненного слоя. Увеличение силы пластического деформирования способствует росту количества дислокаций и, следовательно, созданию мелкодисперсной структуры в поверхностном слое. Дисперсность

структуры определяет глубину фазовых превращений и увеличение микротвердости упрочненного слоя.

Вместе с тем в конкретных условиях обработки существует предельное значение силы тока (например, при упрочнении сверл диаметром 20 мм, изготовленных из стали Р9, при ЭМПО на режиме: P = 900 Н, U = 6 В, v = 10,2 м/мин, S = 0,2 мм/об предельное значение силы тока I = 1000 А). Превышение предельной силы тока сопровождается выделением такого количества теплоты, которое не успевает отводиться в тело детали. Так как быстрорежущие и подобные им высоколегированные стали обладают малой теплопроводностью, то в результате возникновения большого количества теплоты происходит отпуск закаленной стали и снижение эксплуатационных характеристик упрочняемого изделия.

Увеличение давления снижает электрическое сопротивление в зоне контакта, что уменьшает количество выделяемой теплоты. Оптимальное значение радиальной силы при ЭМПО быстрорежущих инструментов основной номенклатуры и типоразмеров составляет 800-1100 Н. Время контакта определяется скоростью обработки. Продолжительность процесса влияет на количество теплоты, выделяющейся в зоне контакта инструмента с деталью. Превышение предельно допустимой продолжительности процесса вызывает появление избыточной теплоты и вследствие этого возникает отпуск закаленной стали, ухудшение качества изделия. Критическую продолжительность процесса следует установить пробной обработкой. Так, для сверл, принятых выше в качестве примера, время обработки на указанных выше режимах, но при силе тока I = 700 А, не должно превышать 0,09 с.

Эффективный метод упрочнения поверхностных слоев деталей машин

Д.т.н., проф. А.Н. Евдокимовой предложен метод фрикционного упрочнения поверхностных слоев деталей машин для повышения их трибохарактеристик.

Для улучшения качества поверхностных слоев деталей машин применяют разные технологические методы, среди которых известной эффективностью отличается фрикционный метод, позволяющий формирование белых слоев. Эти слои отличаются высокой твердостью, износостойкостью и коррозийной стойкостью и получаются при одновременном влиянии на сталь высоких температур и деформаций.

Проф. А.Н. Евдокимовой был разработан метод фрикционного упрочнения с целью получения более износоустойчивых поверхностей деталей машин. Суть метода коротко изложена ниже. На рис. 52 *а* показана обычная схема, по которой реализуют упрочнение фрикционным диском.

При большой скорости диска 2, порядка 70 м/с, в поверхностных слоях детали 1 образуется белый слой некоторой толщины. При этом диск, который вращается, создает в поверхностных слоях детали сдвиговые деформации, которые ограничивают величину рационального деформирования и, вследствие этого, возможности увеличения твердости и глубины белого слоя. В связи с этим предлагается генерировать в поверхностных слоях знакопеременные деформации путем использования совместной работы двух дисков (рис. 52 *б*, *в*). В зависимости от направления вращения дисков 2, 3 в поверхностных слоях возникают од-

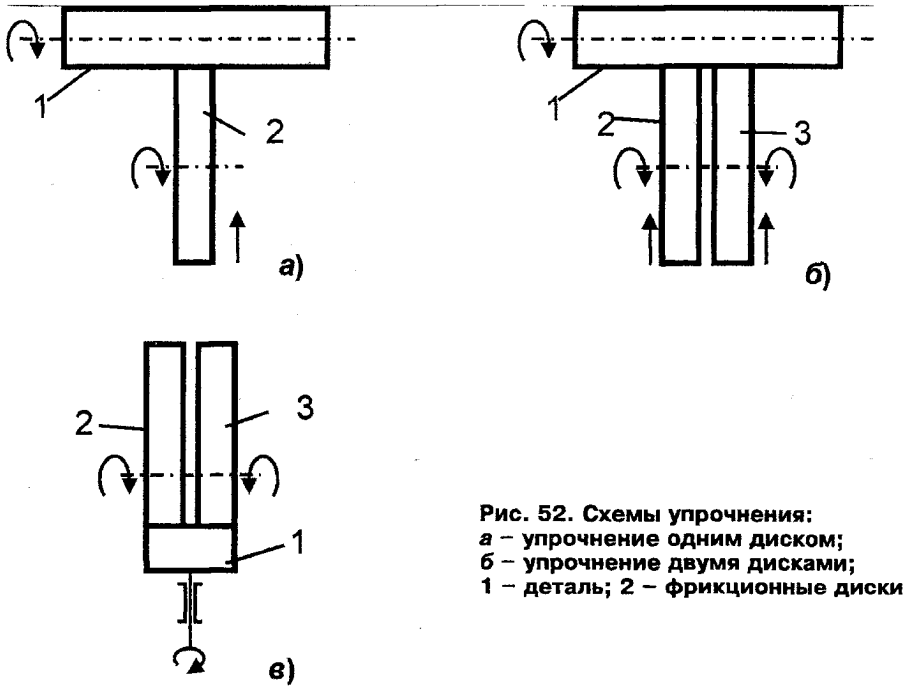


Рис. 52. Схемы упрочнения:
***а* – упрочнение одним диском;**
***б* – упрочнение двумя дисками;**
1 – деталь; 2 – фрикционные диски

нонаправленные или знакопеременные деформации. Было обнаружено, что во время знакопеременного деформирования возникают более экстремальные условия для деформирования белых слоев, чем во время однонаправленного. В результате было определено, что толщина белых слоев увеличивается в 1,5-2 раза сравнительно с однонаправленным деформированием, с соответствующим увеличением поверхностной твердости в 1,2-1,4 раза. Такие слои с более твердым и вытянутым в глубину белым слоем показали повышенную на 30-40% износостойкость при работе деталей на трение скольжения. Кроме того, возросла также предельная погрузка на заедание.

Таким образом, знакопеременное деформирование поверхностных слоев во время фрикционного упрочнения позволяет существенным образом улучшить эксплуатационные свойства деталей машин, которые работают в разнообразных парах трения, по сравнению с существующими методами упрочнения

Поверхностное упрочнение металлических сплавов высокоскоростным знакопеременным трением с применением прерывистых фрикционных дисков

Предлагается д.т.н., проф. А.Н. Евдокимовой.

В научных исследованиях и в заводской практике упрочнение большей частью принято относить к процессам, повышающим твердость поверхностных слоев деталей машин или всего объема материала в целом. Поэтому в известной литературе по упрочнению твердость является главной изучаемой характеристикой, посредством перехода от которой раскрывается ряд важных эксплуатационных свойств, таких, как износостойкость, усталостная прочность и проч. Однако

упрочнение можно рассматривать в более широком ракурсе – не как процесс увеличения твердости, а как какой-либо процесс повышения тех или иных рабочих характеристик деталей машин. При этом может оказаться, что в результате воздействия на материал его твердость уменьшается или не изменяется, а важная рабочая характеристика, например износостойкость, повышается.

Было установлено, что знакопеременность высокоскоростного трения приводит при определенных условиях к значительному повышению твердости поверхностных слоев конструкционных сталей и, как следствие, к увеличению их износостойкости. Аналогичная фрикционная обработка высокооловянистых бронз, не способных к закалке, не увеличивает, а уменьшает микротвердость, но способствует значительному повышению их трибохарактеристик. При рассмотрении этих результатов сначала казалось, что дальнейшие исследования высокоскоростного трения бронз новизной отличаться не могут и должны развиваться в направлении накопления данных применительно к разным деталям машин. Однако оказалось, что в этой технологии высокоскоростного трения имеется весьма перспективный резерв для дальнейшего упрочнения рабочих поверхностей деталей машин, в связи с чем исследования проводили как на сталях, так и на бронзах. Ниже приведена новая методика и полученные результаты по использованию знакопеременного высокоскоростного трения для упрочнения поверхностных слоев деталей из оловянистой бронзы, применяемых в аксиально-поршневых гидромашинах.

На рис. 53 показана методика обработки высокоскоростным трением сферических поверхностей бронзовых блоков гидроцилиндров аксиально-поршневых гидромашин. Знакопеременность сдвиговых деформаций возникает при вращении фрикционного инструмента (2) и блока (1), прижимаемого к нему с заданной нагрузкой. Создание знакопеременных сдвиговых деформаций при обработке сферы блока, как видно из рис. 53, можно осуществить бочкообразным фрикционным инструментом *(а)* или диском *(б)*. Первый вариант инструмента 2 сложнее в изготовлении, хотя и допускает его перешлифовку. Кроме того, при исследовании этого варианта требуются более высокие обороты шпинделя и усилие прижима блока 1 к инструменту, чем в случае применения диска (схема *б*). Так как износ дисков при скоростях 70...80 м/с практически отсутствовал, то была выбрана вторая схема.

Следует отметить, что если в более ранних опытах применялся профильный диск с гладкой цилиндрической поверхностью практически без биения или с заведомо заданным эксцентриситетом (0,020...0,030 мм), то в новой серии опытов были изготовлены диски с прямыми или наклонными канавками на профильной поверхности, как это видно на рис. 53 (варианты *д*, *е*). Ниже приведены результаты экспериментов по оценке влияния прерывистости фрикционного диска на триботехнические свойства поверхности трения бронзового блока цилиндров в паре со стальным распределителем.

На рис. 54 представлены нагрузочные кривые 1-5, показывающие изменение температуры пары с ростом нормальной нагрузки при трении в масле АС-8. Как видно из расположения кривых 1-5, наименьшая предельная нагрузка отвечает паре трения с заводской обработкой сферы блока цилиндров (кривая 1). Лучшие результаты дает обработка гладким диском без биения (кривая 2), затем с биением фрикционного диска (кривая 3). Еще больший эффект имеет место при обработке сферы блока диском без биения, но имеющего на цилиндрической поверхности прямые канавки (кривая 4). И, наконец, наклонные канавки на

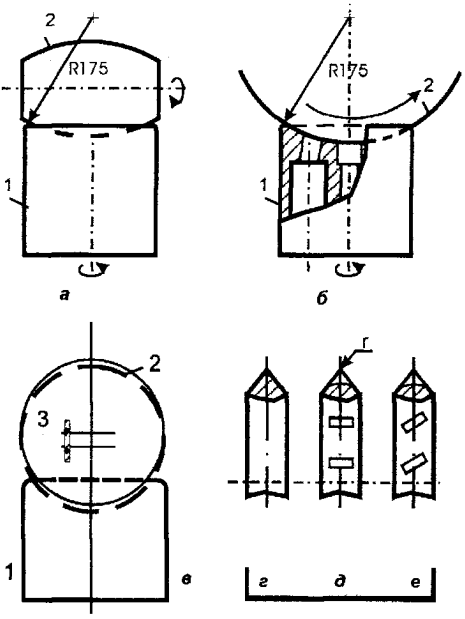


Рис. 53. Форма фрикционных дисков при обработке сферы блоков: 1 – деталь; 2 – диск, *а* – гладкий, бочкообразный инструмент; *б* – плоский диск с угловым профилем; *в* – диск с биением, без прорезей (2); *г* – диск без прорезей; *д* – диск с прямыми прорезями; *е* – диск с наклонными прорезями

диске (кривая 5) приводят к еще большему повышению нагрузочной способности – почти в два раза. Здесь необходимо отметить, что пары трения в опытах не доводились до заедания, а предельная нагрузка определялась по температуре масла, которая ограничивалась 100 °С. Наличие наклонных канавок на фрикционном диске положительно сказывается и на силе трения.

Данные по влиянию условий обработки сферы блока цилиндров на триботехнические характеристики в паре с распределителем из азотированной стали

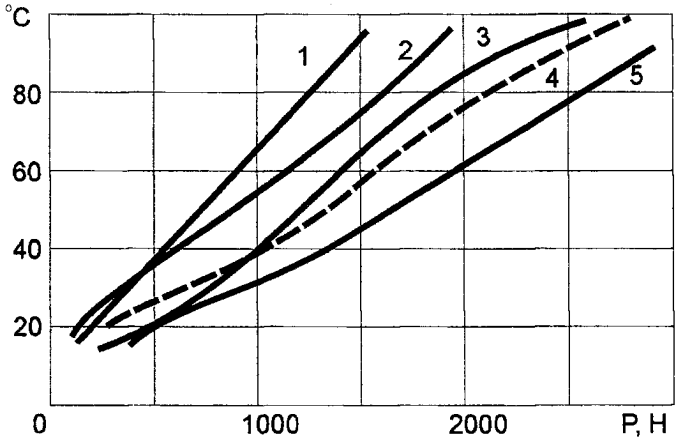


Рис. 54. Влияние обработки сферы блока из бронзы Бр012 на нагрузочные кривые: 1 – исходный притертый блок; 2 – сфера обработана диском без смазки при отсутствии биения; 3 – сфера обработана диском без смазки, с эксцентриситетом 0,05 мм; 4 – канавки прямые; 5 – под углом 45°

38Х2МЮА представлены в табл. 7. Оценивая роль канавок на фрикционном диске на износостойкость пары, можно сделать вывод, что она повышается в 1,8 раза по сравнению с заводской обработкой и в 1,5 раза по сравнению с гладким диском. Это достигается за счет специального рельефа, а также за счет перераспределения на этом рельефе зон с повышенной и особенно пониженной микротвердостью и измененной структурой с выделением меди.

Таким образом, впервые показано положительное влияние рельефа фрикционных дисков и знакопеременности деформирования на трибохарактеристики пары блок – распределитель аксиально-поршневых гидромашин. Рекомендуется использовать эту новую технологию в заводской практике.

7. Влияние условий обработки сферы блока из бронзы Бр012 аксиально-поршневой гидромашины 210.25 на триботехнические свойства пары блок – распределитель

№	Условия обработки сферы блока из бронзы БрО12	P_{max}, Н	f	T, °С	n
1	Заводская обработка сферы резцом и ее притирка	1600	0,07	100	*1,0*
2	Обработка сферы резцом, фрикционная обработка диском без эксцентриситета всухую	1950	0,06	100	1,2
3	Обработка сферы резцом с последующей фрикционной обработкой всухую диском с эксцентриситетом	2600	0,05	100	1,6
4	Обработка сферы резцом, затем фрикционным диском с прямыми канавками	2670	0,05	100	1,7
5	Обработка сферы резцом, затем фрикционным диском с наклонными канавками	2750	0,04	100	1,8

Примечания:

1. n – повышение износостойкости блока по сравнению с заводской обработкой (п. 2).
2. P_{max} – по техническим причинам нагрузка больше не увеличивалась.
3. T, °С – температура и коэффициент трения при предельной нагрузке P_{max}.
4. Распределитель из азотированной стали 38Х2МЮА

Раздел II

УПРОЧНЕНИЕ НЕМЕТАЛЛОВ

Глава 1
УПРОЧНЕНИЕ ТВЕРДОГО СТЕКЛА

Основные свойства стекла

Изделия из стекла и стеклокомпозитов, в том числе армированных металлокордом, металлосеткой, находят все большее применение в строительных конструкциях, в машинах и аппаратах в качестве элементов различного назначения.

Основные физические и химические свойства стекол обеспечиваются их химическим составом, способом приготовления расплава, формования и доработки в твердом состоянии в условиях заводского изготовления и регламентируются при поставках.

Влияние химического состава (оксидов) стекол на их основные свойства приведено в табл. 1.

Существует необходимость и возможность проведения дополнительной упрочняющей обработки стекол вне процесса их изготовления, непосредственно в ходе их потребления в качестве машиноделочного или строительного материала.

Основными свойствами твердых стекол, характеризующими их качество, как конструкционного материала, являются плотность, теплоемкость, теплопрозрачность, теплопроводность, тепловое (термическое) расширение, термостойкость, упругость, прочность, твердость, химическая стойкость. Когда функциональное назначение конструкционного элемента из стекла требует наличия специфических оптических свойств, стекла характеризуют с помощью показателей преломления луча света, относительной прозрачности, относительного поглощения (абсорбции).

Плотность ρ – отношение массы вещества к его объему, выражается в кг/м^3. Плотность стекол в основном зависит от их состава, главным образом от содержания оксидов тяжелых металлов (PbO, BaO).

Ниже приведена плотность некоторых стекол, кг/м^3:

Бесцветные и цветные натрий-кальций-силикатные	2480-2530
Свинцовые хрустали с содержанием PbO, %:	
14-12	2400-2700
12-30	2700-3200
Бариевые хрустали с содержанием 20% BaO	2700-2800

Закаленные стекла имеют плотность на 80-90 кг/м^3 ниже, чем нормально отожженные того же состава. При повышении температуры от 20 до 1300 °С плотность большинства технических стекол уменьшается на 6-12%.

1. Влияние оксидов на свойства стекол

Свойство (характеристика)	Степень влияния оксида на свойство: (+) – увеличивает; (–) – снижает; (±) – зависит от концентрации													
	SiO_2	LiO	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	BaO	ZnO	PbO	Al_2O_3	ZrO_2	B_2O_3	P_2O_5	TiO_2
Температура размягчения	+	-	-	-	-	±	-	-	-	+	+	-	+	-
Вязкость	+	-	-	-	-	±	-	-	-	+	+	-	±	
Кристаллизационная способность	+	+	-	-	+	±	-	+	-	-	+	-	-	-
Поверхностное натяжение	+	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	-	-
Плотность	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Механические свойства	+	-	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	+	+
Химическая стойкость	+	-	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+
Термическое расширение	-	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-	+	-
Термостойкость	+	-	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+	-	+
Показатель преломления	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Теплоемкость c – величина, равная отношению количества теплоты, сообщенной телу (системе) при бесконечно малом изменении его состояния в каком-либо процессе, к соответствующему изменению температуры этого тела. Теплоемкость, отнесенная к единице массы, называется удельной теплоемкостью. Размерность удельной теплоемкости – Дж/(кг·К).

Для стекол различного состава значения теплоемкости при комнатных температурах находятся в пределах 0,30-1,05 кДж/(кг·К).

С повышением температуры теплоемкость возрастает, причем тем медленнее, чем выше температура. Для области стеклования характерно большее изменение теплоемкости при изменении температуры.

Теплопроводность – теплообмен, при котором перенос энергии в форме теплоты в неравномерно нагретой среде имеет атомно-молекулярный характер. Как свойство теплопроводность характеризует способность материала передавать тепловую энергию в направлении более низких температур; размерность теплопроводности – Вт/(м·К). При высоких температурах теплота передается только в тонких (до 0,1 см) слоях стекла. При более толстом слое стекла большое влияние на теплопроводность оказывает тепловое излучение. Теплопроводность, определяемая без учета толщины образца, называется эффективной и включает в себя радиационную (лучистую) составляющую.

Теплопрозрачность характеризует прозрачность стекол для излучения в инфракрасной области спектра. Эта характеристика используется при варке и формовании изделий. Теплопрозрачность уменьшают окрашивающие оксиды (особенно CoO, NiO, FeO и CuO). С повышением содержания этих оксидов теплопередача излучением уменьшается; возрастает роль теплопроводности.

Тепловое (термическое) расширение – изменение размеров тела в процессе его нагревания при постоянном давлении – характеризуется температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) α и объемного β ($\beta = 3\alpha$). ТКЛР выражается в $град^{-1}$.

Наименьшим ТКЛР обладает кварцевое стекло. Компоненты, особенно Na_2O, K_2O, CaO, BaO, PbO, увеличивают ТКЛР. Значения ТКЛР стекол от $5 \cdot 10^{-7}$ (плавленый кварц) до $20 \cdot 10^{-7}$ град$^{-1}$.

Термостойкость стекла в основном определяется ТКЛР: чем он ниже, тем выше термостойкость.

Упругость – способность тела возвращаться к своей первоначальной форме после устранения усилий, вызвавших деформацию тела. Упругость характеризуется модулями упругости E, сдвига G и коэффициентом Пуассона μ, которые выражают в Па и связаны между собой соотношением

$$E/G = 2(1 + \mu).$$

Модуль упругости – величина, равная отношению напряжения к вызванной им упругой деформации. Модуль упругости несколько повышается при замене SiO_2 на CaO, B_2O_3, $A1_2O_3$, MgO, BaO, ZnO, PbO.

В зависимости от химического состава модуль упругости равен (4,8÷8,3) 10^4 Па.

Модуль сдвига (способность стекла сопротивляться деформации сдвига или скола) равен отношению касательного напряжения к углу сдвига. Модуль сдвига для стекла составляет (2÷4,5) 10^4 МПа.

Коэффициент Пуассона (отношение значений поперечной и продольной деформации тела) равен 0,11-0,3.

Прочность – свойство материалов, не разрушаясь, воспринимать те или иные воздействия (нагрузки, температурные, электрические поля и т. п.); прочность выражается в Па (МПа). Прочность характеризуется пределом прочности, при котором образец материала разрушается.

Предел прочности массивного стекла при разрыве или изгибе (в зависимости от состава и состояния поверхности) 25, при сжатии 500-800, при ударном изгибе 15-20 МПа.

Способы повышения прочности: воздушная закалка, ионообменное упрочнение в расплавах солей, нанесение на поверхность оксидно-металлических покрытий.

Твердость – сопротивление материала местной пластической деформации, возникающей при внедрении в него более твердого тела, выражается в Па. Твердость различных стекол 400-1200 МПа. Твердость определяет устойчивость стекла к абразивному повреждению при эксплуатации, имеет большое значение для механической обработки. Наиболее мягкие – свинцовые стекла, наиболее твердые – кварцевые, а также некоторые боросиликатные с содержанием B_2O_3 до 10-12%.

Ниже приведены коэффициенты твердости K для различных оксидов:

Оксид	SiO_2	B_2O_3	$A1_2O_3$	CaO	BaO	ZnO	PbO	Na_2O	K_2O
K	0,332	0,075	0,101	0,638	0,195	0,710	0,145	0,265	0,390

Показатель преломления луча света определяют по формуле

$$n_D = \sin \alpha / \sin \beta.$$

Показатель преломления стекол, не содержащих PbO и BaO, равен 1,500-1,520; свинец- и барийсодержащих промышленных стекол – 1,520-1,580.

Чем больше длина волны падающего луча света, тем меньше показатель преломления. Луч белого (смешанного) света, входя в стекло под углом к поверхности, расщепляется на пучок расходящихся цветовых лучей, т. е. подвергается дисперсии.

Химическая стойкость – способность стекла сопротивляться разрушающему действию воды, кислых и щелочных сред.

По характеру действия на стекло реагенты разделяются на две группы:

1) вода, растворы кислот (кроме плавиковой и фосфорной), нейтральные или кислые растворы солей (водородный показатель pH ≤ 7);

2) растворы гидроксидов, карбонатов, других щелочных реагентов, плавиковая и фосфорная кислоты (pH > 7).

При действии на стекло реагентов 1-й группы происходит выщелачивание поверхности. Реагенты 2-й группы разрушают кремнеземистый каркас стекла. Изделия из основных промышленных стекол в основном подвергаются действию воды или разбавленных кислых сред, в связи с этим водостойкость стекол обычно определяют методом выщелачивания поверхности зерен стекла под воздействием воды или слабых растворов кислот.

Для сравнительной оценки химической стойкости (водостойкости) промышленные стекла классифицируют по гидролитическим классам, характеризующимся расходом 0,01% раствора HCl на 1 кг зерен стекла:

Класс	I	II	III	IV	V
Расход HCl, мл	до 0,1	0,1-0,2	0,2-0,85	0,85-2	2-3,5

Упрочнение термическими методами

Отжиг стекла – это регулируемое охлаждение изделий от температуры формования до температуры цеха. Режим отжига зависит от состава и свойства стекла, размеров и толщины стенок изделий. Чтобы установить режим отжига, определяют две его крайние точки, т. е. тот интервал температур, в пределах которого ослабляются и исчезают остаточные напряжения. Эти температуры соответствуют вязкости 10^{12} Па·с (высшая температура отжига) и 10^{14} Па·с (низшая температура отжига). Для построения температурной кривой отжига необходимо знать состав стекла и размеры изделий.

Для каждого вида изделий делают расчет режима отжига, т. е. определяют для данного состава стекол температуры и параметры отжига по операциям (табл. 2).

При расчете сначала вычисляют высшую температуру отжига в зависимости от состава стекла (табл. 3).

Подобрав состав, наиболее близкий к заданному, проводят корректировку высшей температуры отжига в соответствии с данными табл. 4.

Пример. Рассчитать высшую температуру отжига тарного стекла состава (%): SiO_2 72,7; Al_2O_3 2,5; Fe_2O_3 0,3; CaO 6,0; MgO 4,0; Na_2O 14,5.

1. Из данных табл. 3 находят состав стекла, близкий заданному, – состав № 10. Высшая температура отжига этого состава 560 °С.

2. 1% Al_2O_3 при содержании его в стекле 0-5% повышает температуру отжига на 3 °С (см. табл. 4). В заданном составе стекла содержится 2,5% Al_2O_3. Следовательно, высшая температура отжига понизится на 1,5°С (3 (2,5-3) = –1,5).

2. Температурный режим отжига (по операциям)

Операция	Режим	Операция	Режим
	Полные изделия		**Листовое стекло**
1	Предварительное нагревание (или охлаждение) изделий до высшей температуры отжига	1	Быстрое охлаждение стекла до высшей температуры отжига
2	Выдержка изделий при высшей температуре отжига	2	Медленное охлаждение от высшей до низшей температуры отжига
3	Медленное охлаждение изделий от высшей до низшей температуры отжига	3	Быстрое безопасное охлаждение от низшей температуры окружающей среды
4	Быстрое безопасное охлаждение изделий от низшей температуры отжига до температуры окружающей среды		

3. Высшая температура отжига, °С, в зависимости от содержания оксидов в стекле

Номер состава	Содержание оксида, %											Высшая температура отжига, °С
	SiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	Al_2O_3	Fe_2O_3	B_2O_3	PbO	ZnO	As_2O_3	
1	64,5	7	–	11,5	–	10	–	7	–	–	–	630
2	62,43	8,9	–	6,26	8,06	0,62	0,08	13,65	–	–	–	610
3	71	10,1	–	–	18,6	–	–	–	–	–	0,3	610
4	73,31	8,4	–	6,14	9,38	0,65	0,07	2,05	–	–	–	588
5	74,74	10,38	–	14,22	–	0,45	0,21	–	–	–	–	581
6	68,52	10,26	–	16,22	–	2,5	2,1	–	–	–	–	570
7	73,96	9,74	–	13,54	–	2,67	0,09	–	–	–	–	562
8	74,07	7,91	–	12,72	–	5,23	0,07	–	–	–	–	560
9	72	1,55	0,45	7,2	10,45	–	–	8,15	–	–	0,2	560
10	73	7	2,5	14,5	–	3	–	–	–	–	–	560
11	66,45	5,4	–	7,85	13,7	1,5	–	1,1	–	3,8	0,2	535
12	75	7,52	1,64	14,84	–	9,3	0,08	–	–	–	–	524
13	82,64	0.02	–	16,98	–	0,28	0,08	–	–	–	–	522
14	66,25	17,28	–	15,89	–	0,52	0,06	–	–	–	–	496
15	59,44	–	–	12,31	–	0,42	0,06	–	27,77	–	–	446
16	31,6	–	–	–	2,85	–	–	–	65,35	–	0,2	370

3. 1% CaO при содержании его в стекле 5-10% увеличивает температуру отжига на 6,6 °С. В заданном составе содержится 6% CaO, следовательно, высшая температура отжига понизится на 6,6 °С (6,6 (6-7) = – 6,6).

4. 1% MgO при содержании его в стекле 0-5% повышает температуру отжига на 3,5 °С. В заданном составе содержится 2% MgO, следовательно, высшая температура отжига повысится на 5,25 °С (3,5 (4-2,5) = 5,25).

5. Содержание NaO_2 в обоих стеклах одинаковое, а влияние 0,3% Fe_2O_3 не учитывается.

6. Высшая температура отжига заданного состава стекла $t_в$ = 560-1,5-6,6 + 5,25 ≈ ≈ 557 °С.

4. Изменение высшей температуры отжига, °С, при замене 1% SiO_2 на 1% другого оксида

Оксид	Содержание оксида в стекле, %								
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-50
Na_2O	-	-	-4	-4	-4	-4	-4	-	-
K_2O	-	-	-	-3	-3	-	-	-	-
MgO	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	-	-	-	-
CaO	7,8	6,6	4,2	1,8	0,4	-	-	-	-
ZnO	2,4	2,4	2,4	1,8	1,2	0,4	-	-	-
BaO	1,4	-	-0,2	-0,9	-1,1	-1,6	-2	-2,6	-
PbO	-0,8	-1,4	-1,8	-2,5	-2,6	-2,8	-3	-3,1	-3,1
B_2O_3	8,2	4,8	2,6	0,4	-1,5	-1,5	-2,6	-2,6	-2,8
Al_2O_3	3	3	3	3	-	-	-	-	-
Fe_2O_3	-	-	0,6	1,7	-2,2	-2,8	-	-	-

Для расчета температурно-временных режимов отжига стеклотарных и сортовых изделий используются следующие обозначения: $t_в$ и $t_н$ – высшая и низшая температура отжига, °С; $t'_{изд}$ и $t''_{изд}$ – температура изделий перед отжигом и после отжига, °С; $\alpha' = \alpha \cdot 10^7$ – температурный коэффициент линейного расширения, $°C^{-1}$; a_{max} – максимальная толщина стенки изделия, см; $a_{ср}$ – средняя толщина стенки изделия, см; τ_1, τ_2, τ_3, τ_4 – время охлаждения (нагревания) или выдержки изделий, мин (табл. 5); v_1, v_3, v_4 – скорости охлаждения (нагревания) изделий, °С/мин.

Режимы отжига рассчитывают двумя способами (см. табл. 5). По первому способу скорости и время охлаждения (нагревания) вычисляют по эмпирическим формулам для каждой стадии отжига. По второму способу сначала определяют скорость охлаждения на третьей стадии, а в зависимости от нее – скорость нагревания и охлаждения на первой и четвертой стадиях.

Пример расчета режима отжига тарных изделий из стекла, состав которого приведен при: $t_В$ = 557 °С, $t'_Н$ = 450 °С, $t'_{изд}$ = 450 °С, $t''_{изд}$ = 40 °С, α' = 90 $°C^{-1}$, a_{max} = 0,5 см, $a_{ср}$ = 0,3 см, дан в табл. 6.

В практических условиях время на всех стадиях увеличивается из-за неопределенности температурных границ по длине туннеля печи отжига. Обычно время отжига для принятых видов изделий составляет в зависимости от точности поддержания температуры 50-70 мин.

Контроль качества. Для контроля качества отжига применяется поляризационно-оптический метод, который основан на явлении двойного лучепреломления, возникающем в стекле под действием внутренних напряжений и вызывающем его окраску, наблюдаемую с помощью полярископа. Хороший отжиг характеризуется преобладанием в окраске фиолетовых и красных цветов, удовлетворительный – оранжевых, голубых и голубовато-зеленых, неудовлетворительный – зеленых и желтых цветов. Наиболее точно напряжения в стекле и изделиях можно оценить полярископами – поляриметрами (количественная оценка).

Оборудование для отжига. Стекло вертикального вытягивания отжигается непосредственно в шахте вытягивающей машины, другие виды стекол и изделий – в горизонтальных, а иногда в вертикальных отжигательных печах (табл. 7).

Закалка. При закалке в поверхностных слоях изделий для повышения механической и термической прочности создают остаточные напряжения. Темпе-

5. Формула для расчета режима отжига

Стадии отжига	Способ расчета	
	Первый	Второй
1. Быстрое нагревание (охлаждение) до высшей температуры отжига	$v_1 = \frac{20}{a_{max}} \div \frac{30}{a_{max}}$	$v_1 = 10v_3$
	Нагревание $\tau_1 = \frac{t_в - t'_{изд}}{v_1}$	
	Охлаждение $\tau_1 = \frac{t'_{изд} - t_в}{v_1}$	
2. Выдерживание изделий при высшей температуре отжига	$\tau_2 = (70 \div 120)\frac{a^2_{max}}{4}$	
	Обычно	
3. Медленное охлаждение	$\tau_2 = 102\frac{a^2_{max}}{4}$	$\tau_2 = 28a_{ср} - 3$
	$v_3 = 1{,}33a^2_{max}$	$v_3 = \frac{40}{\alpha' a^2_{ср}}$
	$\tau_3 = \frac{t_в - t_н}{v_3}$	
4. Быстрое охлаждение	$v_4 = \frac{10}{a^2_{max}} \div \frac{15}{a^2_{max}}$	$v_4 = 10v_3$
	Можно принимать $v_4 = 20 \div 60$ °С/мин	
	$\tau_4 = \frac{t_н - t''_{изд}}{v_4}$	
	Температуру изделий можно принимать 40 °С	

Примечания:

1. Режимы отжига плоского стекла (листового, плиток) рассчитывают для стадий 1, 3, 4, при полутолщине стекла $a = \frac{a_{max}}{2}$.
2. Скорость быстрого нагрева (охлаждения) можно рассчитывать по формуле $v_1 = \frac{20}{a^2} \div \frac{30}{a^2}$
3. Скорость медленного охлаждения для листового стекла рассчитывают по формуле $v_3 = 0{,}33/a^2$.

ратуру закалки (°С) приближенно определяют по формуле $t_З = t_В + 80$, где $t_З$ – температура закалки; $t_В$ – высшая температура отжига.

Окончательно температуру закалки устанавливают с учетом практических условий. Закалке подвергают листовое стекло, иногда сортовую посуду, главным образом прессованные стаканы.

Перед закалкой обеспечивают равномерное распределение температуры по толщине изделий. Разность температур не должна быть больше 10 °С. Средняя продолжительность нагрева стекла до температуры закалки при нормальных условиях 40 с на 1 мм толщины стекла. При установлении режима нагрева исходят из этого значения, а затем в процессе работы его корректируют (табл. 8).

6. Пример расчета режимов отжига

Стадия отжига	Способ расчета	
	Первый	Второй
1	$v_1 = \frac{25}{a_{max}} = \frac{25}{0,5} = 50$ °С/мин; $\tau_1 = \frac{557-450}{50} = 2,1$ мин	$v_1 = 10v_3 = 50$ °С/мин; $\tau_1 = \frac{557-450}{50} = 2,1$ мин
2	$\tau_2 = 102(0,25)^2 = 6,4$ мин	$\tau_2 = 28a_{ср} - 3 = 28 \cdot 0,3 - 3 = 5,4$ мин
3	$v_3 = \frac{1,33}{(0,5)^2} = 5,3$ °С/мин; $\tau_3 = \frac{557-450}{5,3} = 20$ мин °С/мин;	$v_3 = \frac{40}{90 \cdot 0,09} = 5$ °С/мин; $\tau_3 = \frac{557-450}{5} = 21,4$ мин °С/мин;
4	$v_4 = \frac{10}{(0,5)^2} = 40$ $\tau_4 = \frac{450-40}{40} = 10,25$ мин	$v_4 = 10v_3 = 50$ $\tau_4 = \frac{450-40}{50} = 8,2$ мин
	$\tau = 38,75$ мин	$\tau = 37,1$ мин

7. Характеристики отжигательных печей для стекла

Показатель	Камерные	Муфельные	Роликовые	Циркуляционные	Вертикальные
Отжигаемые изделия	Полые и штучные	Полые и штучные	Листовое стекло	Листовое стекло, полые и штучные	Полые
Производительность, т/сут	0,02-1,5	1-50	До 600	До 100	1-200
Режим работы	Периодический		Непрерывный		
Источник теплоты	Газообразное и жидкое топливо, электроэнергия				
Характер передачи теплоты	Прямой нагрев,	Муфельный	Муфельный, конвективный	Конвективный	Муфельный, конвективный
Направление движения	–	–	Горизонтальное	–	Вертикальное
Транспортное устройство (конвейер)	–	Сетчатый и пластинчатый	Роликовый	Сетчатый, пластинчатый	Люлечный
Характер движения	–	–	Непрерывный		–
Укладка изделий	Бессистемная	Упорядоченная	Непрерывная лента	Упорядоченная	Бессистемная и упорядоченная
Движение газов	Естественное и принудительное	Естественное		Принудительное	Естественное и принудительное
Скорость продвижения изделий, м/ч	–	1-100	50-1000	1-100	1-30

8. Продолжительность нагрева стекла в зависимости от его толщины

Толщина, мм	Относительная выдержка, с, на 1 мм толщины						
	37	38	39	40	41	42	43
4	2-28	2-32	2-36	2-40	2-44	2-48	2-52
4,1	2-32	2-36	2-40	2-44	2-48	2-52	2-56
4,2	2-35	2-40	2-44	2-48	2-52	2-56	3-01
4,3	2-39	2-43	2-48	2-52	2-56	3-00	3-05
4,4	2-43	2-47	2-52	2-56	3-00	3-05	3-09
4,5	2-46	2-51	2-55	3-00	3-04	3-09	3-13
4,6	2-50	2-55	2-59	3-04	3-08	3-13	3-18
4,7	2-54	2-58	3-03	3-08	3-12	3-17	3-22
4,8	2-58	3-02	3-07	3-12	3-17	3-21	3-26
4,9	3-01	3-06	3-11	3-16	3-21	3-26	3-31
5	3-05	3-10	3-15	3-20	3-25	3-30	3-35
5,1	3-09	3-14	3-19	3-24	3-29	3-34	3-39
5,2	3-13	3-18	3-23	3-28	3-33	3-38	3-43
5,3	3-16	3-21	3-27	3-32	3-37	3-43	3-48
5,4	3-20	3-25	3-31	3-36	3-41	3-47	3-52
5,5	3-24	3-29	3-35	3-40	3-45	3-51	3-56

Ионный обмен. Упрочнение ионным обменом основано на обработке изделий из стекла с достаточным содержанием оксида щелочного металла. При упрочнении в расплаве KNO_3 (температура расплава 400-500 °С, время выдержки 1-6 ч) ионы Na^+ радиусом 0,098 мм (в стекле) замещаются ионами K^+ радиусом 0,133 мм (из расплава).

Основная реакция ионного обмена

$$\equiv Si - O - Na^+ + K^+ \rightleftarrows \equiv Si - O - K^+ + Na^+$$

При этом структура поверхностного слоя уплотняется на глубину 10-60 мкм за счет большого размера ионов калия. Появляются напряжения сжатия. Возрастают механическая прочность стекла в 2-4 и термостойкость в 1,5-2 раза.

Ионный обмен в расплаве применяют для упрочнения специальных технических изделий, деталей конструкций машин, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, сопровождающихся повышенными температурами, особенно в агрессивных средах. Процесс используют для упрочнения стеклянных изделий, например тонкостенных стаканов, колб, пробирок и т. п. полых предметов.

Поверхностные покрытия. Для улучшения эксплуатационных свойств стеклянных изделий на их поверхность наносят тонкие покрытия. Они бывают неорганические, органические, кремнийорганические. Среди неорганических покрытий наиболее распространены оксидно-металлические покрытия, получаемые при гидролизе солей на горячем стекле (табл. 9). Эти покрытия повышают микротвердость и абразивостойкость поверхности.

Оксидно-металлические покрытия наносят обычно на горячие изделия (t = 600÷700 °С) непосредственно после формования или на отожженные подогретые. На машинах ВВС покрытия наносят на вытягиваемую ленту стекла в первой секции машины, при прокате – на некотором расстоянии от прокатывающих

9. Характеристика оксидно-металлических покрытий

Химический состав	Соль для синтеза	Растворитель	Концентрация растворителя, %	Цвет	Назначение
SnO_2, TiO_2	$SnCl_4$, $TiCl_4$	Безводные	100	Бесцветное	Защитоупрочняющее
SnO_2	$SnCl_4 \cdot 5H_2O$	Вода, этиловый спирт	10-15	»	Токопроводящее
SnO_2	$SnCl_4 \cdot 5H_2O + HCl + NH_4F$	Вода	50	»	Радиозащитное
SnO_2, Sb	$SnCl_4 \cdot 5H_2O + SbCl_3$	Вода, этиловый спирт	50	Голубой, синий	Теплопоглощающее, теплоотражающее
SnO_2, Bi	$SnCl_4 \cdot 5H_2O + Bi(NO_3)_2 \cdot 5H_2O$	Вода, соляная кислота	50	Зеленый	Декоративное остекление
Fe_2O_3	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	Вода, этиловый спирт	30-80	Желтый	Поглощающее ультрафиолетовые лучи, декоративное
Fe_2O_3, Sn	$FeCl_3 \cdot 6H_2O + SnCl_2 \cdot 2H_2O$	Вода, этиловый спирт	30-80	Желтый, оранжевый	Декоративное остекление и поглощение ультрафиолетовых лучей
TiO_2	$TiCl_4$	Этиловый спирт	15-20	Бесцветное	Для одностороннего просмотра
Co_3O_4	$Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ $Co(C_2H_3O_2) \cdot 4H_2O$	Этиловый спирт, вода	10-30	Голубой, синий	Солнцезащитное
Cr_2O_3	CrO_3	Соляная и уксусная кислота	20-30	Зеленый	Декоративное освещение

валиков. Стеклянную тару защищают покрытием на горячем конвейере, а на половинки стеклоблоков покрытие наносят после извлечения их из пресс-формы.

Органические покрытия обычно наносят после отжига при температуре 150-200 °С чаще всего на стеклотару. Эти покрытия (эпоксидные смолы) обладают высокими гидрофобизирующими (ухудшающими смачивание) и протекторными (защитными) качествами, но неустойчивы к абразивному воздействию.

Упрочнение химическими методами

Химическая обработка стекла основана на его разрушении плавиковой кислотой.

Виды обработки:

- *полирование* – применяется для обработки элементов алмазной резьбы преимущественно на изделиях из свинцового хрусталя [полировальный состав – смесь плавиковой HF и серной H_2SO_4 кислот (система HF – H_2SO_4 – H_2O – стекло)];
- *декоративное травление* – применяют с защитными покрытиями, по которым наносят рисунок;
- *светлое травление* – выполняют таким составом раствора, что в результате химических реакций образуются растворимые соли (рисунок прозрачный);
- *матовое травление* – характеризуется тем, что образуются нерастворимые соли и рисунок получается матовый.

Полирование. Наибольший объем химической обработки приходится на полирование (табл. 10, 11). Для этого вида обработки применяют плавиковую кислоту 40-70%-ной концентрации, плотностью 1110-1140 кг/м^3 и серную кислоту 92-96%-ной концентрации, плотностью 1840 кг/м^3.

Процесс обработки бывает много- и одноцикловый. При многоцикловом полировании изделия во вращающейся кассете многократно погружают в рабочую смесь плавиковой и серной кислот (t = 50÷65°С). В зависимости от вида изделий и рисунка число циклов доходит до 40. Промывают изделия в воде (t = 50÷70 °С) или лучше в серной кислоте (t = 60÷70 °С). При одноцикловом поли ровании к изделиям, уложенным в кассету и помещенным в барабан, подводят полирующую смесь (t = 50÷60 °С). Кассета вращается в смеси кислот до завершения цикла полирования. Промывают изделия в воде (t = 50÷60°С).

Травление. Для обработки используют жидкие травильные смеси и пасты (табл. 12). Перед нанесением травильного вещества поверхность изделия полностью или частично защищают покрытием (табл. 13).

Декоративные упрочняющие покрытия. *Оксидно-металлические покрытия* получают при обработке изделий (после формования) растворами солей разных металлов, а также возгонкой твердых солей, в результате чего на поверхности изделий образуется тонкая радужная пленка (иризация). Для получения иризирующего эффекта стекло должно иметь температуру, близкую к температуре размягчения. Реже применяют низкотемпературную иризацию (~220°С). Наибольшей способностью давать иризирующие пленки обладает $SnCl_2$. Для получения различных оттенков к нему добавляют и другие соли (табл. 14).

10. Химические реакции при полировании стекла

Этапы полирования	Реакции	Характеристика этапа
1. Действие избытка плавиковой кислоты на стекло	$Na_2O \cdot SiO_2 + 6HF \rightarrow Na_2SiF_6 + 3H_2O$ $K_2O \cdot SiO_2 + 6HF \rightarrow K_2SiF_6 + 3H_2O$ $PbO \cdot SiO_2 + 8HF \rightarrow PbF_2 + 2H^+ + (SiF_6)^{2-} + 3H_2O$ $CaO \cdot SiO_2 + 8HF \rightarrow CaF_2 + 2H^+ + (SiF_6)^{2-} + 3H_20$ $MgO \cdot SiO_2 + 8HF \rightarrow MgF_6 + 2H^+ + (SiF_6)^{2-} + 3H_2O$ $SiO_2 + 6HF \rightarrow (SiF_6)^{2-} + 2H^+ + 2H_2O$	Равновесие в полирующем растворе смещено в сторону образования продуктов реакции
2. Действие серной кислоты на продукты реакций первого этапа	$Na_2SiF_6 + H_2SO_4 \rightleftarrows Na_2SO_4 + (SiF_6)^{2-} + 2H^+$ $K_2SiF_6 + SO_4 \rightleftarrows K_2SO_4 + (SiF_6)^{2-} + 2H^+$ $PbF_2 + H_2SO_4 \rightleftarrows PbSO_4 + 2HF$ $CaF_2 + H_2SO_4 \rightleftarrows CaSO_4 + 2HF$ $MgF_2 + H_2SO_4 \rightleftarrows MgSO_4 + 2HF$ $2H^+ (SiF_6)^{2-} \rightleftarrows SiF_6 + 2HF$	Реакции обратимы, смещение равновесия зависит от концентрации H_2SO_4, степени разбавления раствора и температуры
3. Полирование с применением солей плавиковой кислоты	$2NH_4F + H_2SO_4 = (NH_4)_2SO_4 + 2HF$ $NH_4HF_2 + H_2SO_4 = NH_4HSO_4 + 2HF$	В результате взаимодействия $NH_4F \cdot NH_4HF_2$ с H_2SO_4 в полирующем растворе образуется плавиковая кислота

11. Технологические характеристики операции полирования

Показатель	Варианты операции		
	I	II	III
Исходная концентрация F^- в полирующем растворе, %	7	3	8-11
Концентрация H_2SO_4 в растворе, %:			
полирующем	58-62	-	50-63
промывочном	55-62	-	-
Температура раствора, °С:			
полирующего	55-65	55-65	50-60
промывочного	60-70	50-70	45-55
Частота вращения кассет, $мин^{-1}$	11-13	14-16	21-24
Концентрация F^-, %:			
в полирующем растворе перед регенерацией	3	17-18	4-4,5
конечная	2-3	1,3	4-4,5
Периодичность регенерации полирующего раствора (число рейсов)	4-5	2-3	6
Число регенерации раствора в смену	1	2	1
Время нахождения изделий в полирующем растворе, мин:			
до регенерации	2-7	5-20	3-12
после регенерации	5-13	8-30	3-12
Число циклов полирования партии изделий:			
до регенерации	12-30	24-40	1
после регенерации	21-26	27-38	1-2
Общее время полирования партии изделий, мин:			
до регенерации	18-42	36-70	12-27
после регенерации	34-55	42-78	14-38

Примечание. Расход кислот зависит в основном от размеров полируемых изделий: для крупных изделий – наименьший, мелких – наибольший. Расход HF при полировании крупных изделий 220-250 кг на 1 т продукции, средних и мелких – соответственно, на 20 и 50% больше.

12. Составы травильных смесей

Компонент	Номер состава			
	1	2	3	4
Плавиковая кислота HF	16,7	28,6	-	22,3
Серная кислота H_2SO_4	22,6	-	8,7	-
Фторид аммония NH_4F	-	23,8	43,5	22,2
Сульфат аммония $(NH_4)_2SO_4$	-	-	4,3	-
Сульфат бария $BaSO_4$	-	-	-	55,6
Вода H_2O	60,7	47,6	43,5	-

Примечание. Составы применяют: 1-й – для светлого травления; 2-й и 3-й – для матового травления; 4-й – травильная паста.

13. Составы защитных покрытий, мас. части

Компонент	Номер состава						
	1	2	3	4	5	6	7
Пчелиный воск	80	75	80	80	93	80	8,3
Канифоль	10	15	12	8	-	10	-
Технический каучук	-	-	-	1	2	-	-
Церезин	10	10	10	10	-	10	-
Парафин	10	-	-	-	-	-	25
Озокерит	-	-	-	-	-	-	66,7

14. Составы иризирующих смесей, %

Компонент	Синий	Красный	Радужные		Опаловый
			1-й	2-й	
Хлорид олова $ZnCl_2$	80	88	54	57	90
Нитрат стронция $Sr(NO_3)_2$	5	7	23	19	-
Хлорид бария $BaCl_2$	15	5	17	19	-
Ацетат свинца $Pb(CH_3CoO)_2$	-	-	6	5	-
Нитрат висмута $Bi(NO_3)_2$	-	-	-	-	10

Покрытия, выполненные золотом и люстровыми красками (люстрами), получаются после нанесения на изделия соответствующих препаратов в холодном состоянии и последующего обжига (табл. 15).

Покрытия и рисунки, выполненные на стекле силикатными красками. Силикатные краски состоят из флюса и красителя. Если при приготовлении краски материалы, образующие флюс, были сплавлены вместе с красителями (табл. 16), то получается прозрачная краска. Если бесцветный флюс плавят отдельно, а потом размалывают совместно с пигментом, получаются непрозрачные краски (эмали) (табл. 17). Для многоцветного декорирования изделий используют термопластические краски, которые позволяют механизировать многоцветное декорирование. В состав этих красок вводятся термопластичные связующие вещества (табл. 18), твердые при комнатной температуре и разжиженные при 50-90 °С.

Способы нанесения красок:

- живописные работы и роспись – ручное нанесение краски с помощью кисти;

15. Технологическая характеристика покрытий, выполненных золотом и люстровыми красками

Параметры	Золото	Люстры
Применяемый препарат	12%-ное жидкое золото с добавками	Растворы смолянокислых солей тяжелых металлов в органических растворителях
Соединения металлов, содержащиеся в препарате	Bi, Cr, Co	Бесцветные – Bi, Al, Pb, Zn, Ti, Sn Цветные – Fe, Co, Cu, Cr, Ni, Au, Ag
Растворители	Терпентиновые, лавандовые, розмариновые масла; частично – бензол, толуол	
Способ нанесения препарата на изделия	Ручной, механизированный	
Оборудование для обжига покрытий	Электрическая муфельная печь	
Температура обжига покрытий, °С	560-600	530-580
Вид покрытия	Блестящая пленка металлического золота	Бесцветные и цветные
Толщина покрытия, мм	$(0,2\text{-}1,2) \cdot 10^{-4}$	10^{-3}

16. Содержание красителя для прозрачных силикатных красок

Цвет краски	Краситель	Содержание, %	Цвет краски	Краситель	Содержание, %
Красный	Au	1,0	Розовый	MnO_2	0,6-1,0
Желтый	Cr_2O_3 $PbCrO_4$	0,3-0,8	Голубой	CuO CoO	0,8 0,4
Зеленый	CuO	5,0-7,0	Аметистовый	CoO MnO_2	0,8 0,8-1,0
Желто-зеленый	CuO Cr_2O_3	4,0	Красно-фиолетовый	MnO_2	3,0
Сине-зеленый	CuO Cr_2O_3	0,3-0,8 1,5-4,8	Сиреневый	Au Mn_2O_3 Sb_2O_3 As_2O_3	0,05 0,4 0,8 0,2
Синий	CoO CuO	2,5-5,0 1,5			

17. Составы пигментов, вводимых в стали, в зависимости от цвета эмали

Цвет эмали	Пигмент
Голубой	$CoO + Al_2O_3$; $CoO + ZnO + Al_2O_3$
Синий	$CoO + ZnO + Al_2O_3$
Желтый	$V_2O_5 + TiO_2 + ZrO_2$
Зеленый	$CoO + Cr_2O_3 + ZnO + S$
Сине-зеленый	$CoO + Cr_2O_3 + ZnO + Al_2O_3 + B_2O_3$
Коричневый	$Cr_2O_3 + Fe_2O_3 + ZnO$
Черный	$CoO + Cr_2O_3 + Fe_2O_3$
Белый	Sb_2O_3, ZnO, TiO_2, ZrO_2
Оранжевый	$Se + CdCO_3 + S + ZnO$
Красный	$Se + CdCO_3 + S$

- аэрография (табл. 19) – нанесение краски распылением с помощью сжатого воздуха (ручное и механизированное);
- шелкотрафаретная печать – продавливание краски пастообразной консистенции через сетчатые трафареты;
- декалькомания (табл. 20) – рисунок, напечатанный на клеевой бумаге (деколь), переводится на изделие при смачивании водой;
- фотопечать – применение клейкой фоточувствительной эмульсии, к которой силикатная краска пристает пропорционально силе засвечивания.

18. Составы термопластичных связующих, %

Компонент	Номер состава				
	1	2	3	4	5
Воск пчелиный	76	55	57,26	33,33	-
Спермацет	-	15,2	16,48	23,92	60
Канифоль	14,88	17	9,73	15,82	-
Касторовое масло	9,12	12.8	6,8	11,11	-
Бальзам	-	-	9,73	15,82	-
Парафин	-	-	-	-	40

19. Составы, %, разбавителей и связующих при нанесении красок аэрографией

Композит	Состав	Композит	Состав
Скипидар Канифольно-скипидарная мастика (50:50)	75 25	Оксиэтилцеллюлоза Третичный бутиловый спирт Вода	3 30 67
Клеевой раствор декстрина в воде (50:50) Вода	25 75	Натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы Лавандовое масло Этиловый спирт Калийное мыло Вода	0,5-1 0,01-0,02 0,1-0,28 0,01-0,1 Остальное
Целлюлоза (2%-ный водный раствор) Мыльный спирт Вода	72,5 1,5 26		

20. Составы, %, лаковы[покрытий для деколей

Компонент	Номер состава					
	1	2	3	4	5	6
Полибутилметакрилат	33,1	26,7	34,0	31,0	-	-
Тетралин	1,6	1,2	-	2,56	30,0	-
Дибутилфталат	0,5	1,2	-	0,97	3,03	2,0
Сольвент	64,7	62,8	-	-	-	-
Судан	0,1	-	-	-	-	-
Декстрин	-	7,8	-	-	-	-
Краситель	-	0,3	-	-	-	-
Скипидар	-	-	66,0	-	-	-
Ксилол	-	-	-	65,47	-	68,0
Сополимер БМК-5	-	-	-	-	28,0	-
Бутилацетат	-	-	-	-	38,97	-
Акриловая смола	-	-	-	-	-	30,0

Примечание. Толщина лаковой пленки 30 мкм.

Возможные дефекты и способы их устранения. Дефекты, возникающие при выработке изделий из стекла, причины их возникновения и способы устранения приведены в табл. 21.

21. Возможные дефекты при выработке изделий, причины их появления и способы устранения

Дефект	Причины появления	Способ устранения
Камни, свили, шлиры	Растворение кранцев, горшков и других огнеупоров	Перед началом выработки стекломассу перемешать
	Резкое охлаждение стекломассы	Соблюдать заданный режим охлаждения
	Набор стекломассы за пределами кранца и из поверхностного слоя	Набирать стекломассу из середины защитного кранца при погружении баночки или наборного тела в стекломассу
Пузырь	Неправильный набор стекломассы (медленное погружение баночки или наборного тела при вращении)	Быстро погружать баночку или наборное тело в стекломассу, после чего начинать вращение
	Переохлаждение стекла в процессе закатывания	Соблюдать необходимый температурный режим, ускорить процесс закатывания
Окалина	Плохая и несвоевременная очистка стеклодувной трубки, наборного стержня	Удалить окалину с трубки легкими ударами и продуванием Смочить конец трубки в суспензии глины или каолина Наборный стержень очищать в горизонтальном положении при вращении
Слоистость	Набор стекла из разных горшков или из разных мест	Набирать стекломассу из одного горшка из середины защитного кранца
Загрязнение изделий	Сухой катальник	Очистить катальник и смочить его водой
Царапины, черченость	Грязная форма	Соблюдать правила хранения, лакировки и эксплуатации форм
	Небрежно приготовленный состав для лакировки форм	
Тусклые пятна на поверхности изделий	Смачивание формы загрязненной водой	Использовать для охлаждения проточную воду или менять ее не реже двух раз в смену. Не допускать загрязнения воды

Упрочнение методами механической обработки

Механическая обработка (шлифование, полирование, огранение) твердых стекол позволяет ликвидировать концентраторы напряжений в виде мелких трещин, острых кромок, резких переходов, не предусмотренных конструктивным назначением изделия.

Для механической обработки стекла применяют свободные абразивы (песок, наждак, пемзу, полирит, оксид олова), абразивные инструменты (шлифовальные круги из корунда, наждака, карбида кремния, эльбора и алмаза, шайбы из песчаника) (табл. 22), а также алмазные инструменты.

22. Характеристика абразивных шлифующих материалов

Вид	Основное вещество		Примеси	Плотность, кг/м³	Твердость по шкале Мооса	Цвет
	Химический состав	Содержание, %				
Естественные абразивы						
Алмаз	C	100		3400-3600	10	Бесцветный
Корунд	Al_2O_3	98-99	SiO_2, Fe_2O_3		9	Синевато-серый, синий, бурый, красный
Наждак	Al_2O_3	20-65	Fe_3O_4, SiO_2	4000-3600	7,2-7,5	Черный, черно-синий
Кварц	SiO_2	95-98	Al_2O_3, Fe_2O	2600	7	Бесцветный, желтоватый
Искусственные абразивы						
Карбид кремния	SiC	98	Fe	3100-3400	9,5-9,75	Зеленовато-черный с побежалостью
Электрокорунд (алунд)	Al_2O_3	98-99	SiO_2, Fe_2O_3 TiO_2	3200-4900	9	Белый, розовый

В шлифовальных кругах используют следующие виды связок:

- неорганические – керамические К, металлические М;
- органические – бакелитовые Б, вулканитовые В.

По твердости шлифовальные круги подразделяются на следующие виды:

- чрезвычайно мягкие – ЧМ; весьма мягкие – $ВМ_1$, $ВМ_2$; мягкие – $М_1$, $М_2$, $М_3$, средней мягкости – $СМ_1$, $СМ_2$;
- средние $С_1$, $С_2$;
- средней твердости – $СТ_1$, $СТ_2$, $СТ_3$, твердые – $Т_1$, $Т_2$; весьма твердые – $ВТ_1$, $ВТ_2$; чрезвычайно твердые – $ЧТ_1$, $ЧТ_2$.

Структура круга характеризуется соотношением объемов абразивных зерен, связки и пор и имеет следующие условные обозначения: 1, 2 – очень плотная; 3, 4 – плотная; 5, б – средняя; 7, 8 – открытая; 9, 10, 11, 12 – очень открытая; 13, 14, 15, 16, 17, 18 – высокопористая (для обработки сортовой посуды обычно применяют круги 5-8 структур).

Алмазные зерна подразделяются на следующие виды: АСО – алмаз синтетический обычной прочности, АСР – алмаз синтетический повышенной прочности, АСВ – алмаз синтетический высокой прочности.

Ниже приведена концентрация алмазов в инструменте:

Содержание алмазов в 1 см³ алмазного слоя, г	44	88	132	176
Цифровое обозначение в марке инструмента	50	100	150	200

Шлифовальные круги маркируют условными обозначениями на торцовой поверхности, а при ее отсутствии условные обозначения указывают в паспорте.

Пример обозначения шлифовального круга:

ЧАЗ 23А40 $С_2$К5 35 м/с ПП 350×40×127А. Здесь: ЧАЗ – завод-изготовитель, 23А – марка абразивного материала (электрокорунд белый), 40 – зернистость, $С_2$ – степень твердости (средняя вторая), К – вид связки (керамическая), 5 – номер

структуры, 35 м/с – окружная скорость, при которой обеспечивается безопасная работа, ПП – форма круга (плоский прямого профиля) 350×40×127 – геометрические размеры (наружный диаметр × ширина режущей кромки × внутренний диаметр), А – класс круга.

Пример обозначения алмазного круга:

АПП 120×20×5×32 АСВ 50/40 М1 50 79 1600 1984 ТЗАИ.

Здесь: АПП – тип круга (алмазный плоского прямого профиля), 120×20×5×32 – геометрические размеры (наружный диаметр × ширина × толщина алмазоносного слоя × диаметр посадочного отверстия), АСВ – вид алмаза (алмаз синтетический высокой прочности), 50/40 – зернистость (верхний и нижний пределы размера зерен, мкм), М1 – вид связки (металлическая), 50 – условное обозначение показателя концентрации алмазов в круге, 79 – масса алмазов в круге, караты, 1600 – номер круга, 1984 – год изготовления круга, ТЗАИ – завод-изготовитель.

Классы кругов: АА – наиболее высокий класс; не допускаются: железистые включения, повреждения кромок круга; АБ – допускается небольшое количество железистых включений малых размеров; незначительные повреждения (не более 1/20 ширины кромки, радиуса и длины окружности).

Цветными полосами (международная маркировка) обозначают скорость круга, м/с: 35 белой, 45 голубой, 60 желтой, 80 красной, 100 зеленой.

Выбор абразивных материалов и инструментов определяется способом обработки и видом обрабатываемых изделий (табл. 23).

После шлифования крупных изделий применяют их механическое полирование.

Полирующие материалы бывают следующих составов: пемза (тонкодисперсная горная порода) – 67% SiO_2, 14% $A1_20_8$, 8% $Na_2O + K_2O$, 3% $CaO + MgO$, 2% Fe_2O_3; полирит (смесь оксидов редкоземельных элементов – отходы химического производства) – преимущественно CeC_2, крокус (природный или синтетический материал) – преимущественно Fe_2O_3.

Характеристики алмазных инструментов для обработки стекла приведены в табл. 24, режимы резания в табл. 25. Составы смазочно-охлаждающих жидкостей, применяемых при механической обработке стекла, даны в табл. 26-28. Характеристики шероховатости обработанной поверхности стеклянных изделий указаны в табл. 29-30.

С увеличением зернистости алмазов возрастает шероховатость обработанной поверхности. Такая же зависимость наблюдается и для одного из наиболее важных показателей процесса шлифования – глубины "трещиноватого" слоя (табл. 31).

Абсолютная величина "трещиноватого" слоя при шлифовании алмазными кругами в 1,5-2 раза меньше, чем при обработке свободным абразивом такой же зернистости.

Шероховатость поверхности зависит и от концентрации алмазов. Путем изменения концентрации и зернистости алмазов можно регулировать количество работающих зерен, расстояние между ними, выступание зерен над связкой. Эти факторы оказывают непосредственное влияние на усилия, действующие на зерна, глубину их врезания в материал, температуру в зоне обработки, интенсивность разрушения обрабатываемого материала, износ инструмента, шероховатость обработанной поверхности и ряд других показателей процесса.

23. Применяемость алмазных инструментов для обработки изделий из стекла

Изделия		Инструменты и режимы резания	
Диаметр, мм	Толщина, мм	Окружная скорость, м/с	Марка и зернистость
Предварительная обработка любых изделий			
100	20	30-40	АПВ 50/40 (63/50) М1 50
Декоративная обработка изделий Мелких			
250	6-8	30-40	АСР 50/40 М1 100 АСМ 50/40 М1 100
150	10-20	25-30	АСМ 50/40 М1 100
150	3-6		
75	6	15-20	АСМ 50/40 М1 100
Среднего размера			
250	6-8	30-40	АСВ 50/40 М1 100-150
150	3-6	25-35	АСВ 50/40 М1 100-150
75	6	15-20	АСВ 50/40 М1 100-150
Крупных			
250	8-12	33-44	АСР 125/100 100; АСВ 100/80 100; АСВ 50/40 100-150
Особо крупных			
250	6	30-40	АСВ 50/40 М2 100-150
250	12-16	33-34	АСВ 125/100; АСВ 100/80; АСВ 50/40; М1 100-150
250	6-8	30-40	АСВ 50/40 М1
150	6	25-35	АСВ 50/40 М1

Примечание. Угол заточки кругов для декоративной обработки изделий 90-110°.

В процессе торцового шлифования технического стекла с повышением концентрации уменьшается расход алмазов, снижается шероховатость обработанной поверхности, однако ухудшается режущая способность алмазного инструмента. С повышением концентрации увеличивается число режущих зерен на площади контакта при постоянной величине удельного давления шлифования и вследствие этого уменьшается оптимальная нагрузка на зерно. Это, в свою очередь, вызывает уменьшение глубины внедрения алмазного зерна в обрабатываемый материал и съема материала, ухудшение условий самозатачивания инструмента в процессе его работы.

При торцовом шлифовании стекла необходимо применять круги с 25-50%-ной концентрацией алмазов, которые, несмотря на несколько больший удельный расход алмазов по сравнению с кругами 75-100%-ной концентрации, обеспечивают высокую производительность обработки и стабильную работу инструмента до полного износа алмазоносного слоя.

Наиболее рациональной маркой алмазов для операций грубого шлифования стекла, обеспечивающей минимальную стоимость обработки, является АС6.

24. Характеристики алмазного инструмента для обработки стекла

Вид круга, инструмента	Форма (тип)	Основные размеры *, мм				
		D	*d*	*H*	*S*	α, град
Круги общего назначения						
Плоские прямого профиля	1А1 (АПП)	16-500	6-305	2-100	2-6	-
Плоские прямого профиля без корпуса	А8 (А1ПП)	6-13	2-4	6-10	2-6	-
Плоские прямого профиля трехсторонние	14U1 (А2ПП)	125-250	32-76	10-100	4-12	-
Плоские с выточкой	6А2 (АПВ)	50-300	16-127	22-33	2-6	-
Чашечные конические	12А2 с углом 45° (АЧК)	50-250	16-127	19,5-52	1,5-5	-
Плоские с двусторонним коническим профилем	14ЕЕ1Х (А2П)	25-400	6-203	3-10	2-5	40-120
Плоские с полукругловыпуклым профилем	1FF1X (А5П)	50-250	16-51	2-30	2-6	-
Отрезные	АОК	5-500	12-76	0,15- 2,4	2,5-5,0	-
Отрезные сегментные:	АОСК					
с широкими пазами		250-2000	32-200	2,6-12	5-7	-
с узкими пазами		250-500	32-90	2,6-5,5	5	-
Отрезные с внутренней режущей кромкой	АКВР	206-380	83-130	0,2-0,25	1,5-2	-
Сверла						
Кольцевые	Тип 1	3-10	1,4-7		6	-
	С1, С2	20-215	14,8-208	20-30	3-4	-
Перфорированные	-	0,5-17	-	20-40	2-7	-
Круги специального назначения						
Кольцевые	2А2 (АК)	5-280	4,8-280	8-20	3-5	-
Плоские	6А2Т (АП)	100-400	40-80	16-18	3-5	-
Для обработки сортового и художественного стекла:						
плоские с двусторонним коническим профилем	14ЕЕ1Х (А2П) 1ЕЕ1Х, 1Е1Х	75-250	32-42	6-32	5-10	90-140
плоские с выточкой	6А2 (АПВ)	63-150	20	6-32	5	-
Плоские с полукругло-выпуклым профилем для обработки кромок стекла	2F6 (А6П)	250	200	12-17	7-9	-
Профильные для обработки кромок стекла	2FF6 (АРК)	250	200	9-12	-	-
Эластичные для обработки экранов-кинескопов	АЭТ	250-320	-	64-322	-	-
Эластичные	ДО (АЭД)	20	60	-	-	-

***Обозначения основных размеров:**
D – наружный диаметр, *d* – диаметр отверстия, *H* – высота или ширина рабочей части круга, инструмента, *S* – толщина алмазного слоя, α – угол конического профиля.

Наименьший расход алмазов наблюдается при работе инструмента со скоростью резания 12-18 м/с. Увеличение удельного расхода при скоростях резания 5-10 м/с объясняется увеличением времени контакта каждого активно работающего алмазного зерна с обрабатываемым материалом, более интенсивным изнашиванием и скалыванием алмазных зерен в связке. При скорости резания свыше 20 м/с возникают повышенные вибрации шпиндельной группы, также вызываю-

25. Режимы резания на различных технологических операциях при обработке стекла алмазными кругами

Операция	Обрабатываемый материал	Скорость резания, м/с	Давление шлифования, МПа	Продольная подача, м/мин	Глубина шлифования, мм
Притупление кромки	Автомобильное стекло всех марок (в том числе триплекс, сталинит)	25-30	1,3-30	0,5-1,5	0,5-1,0
Обработка торца по радиусу	То же	30-35	-	3-5	1,5-2,0
Резание	Техническое стекло различных марок	40-50	-	0,2-0,8	20-30
Шлифование кромки полированного стекла	Зеркальное и мебельное стекла	30-35	-	3-5	1,5-2,0
Фацетирование	Зеркальное стекло	20-30	-	1,2-3,4	2,0-3,0
Декорирование ручное и механизированное	Хрусталь	25-35	0,4-0,5	-	1,0-5,0
Шлифование края стеклоизделий	»	15-20	0,8-1,0	-	2,0-3,0
Сверление	Техническое стекло	0,2-0,3	4,0-6,0	-	-

26. Состав, %, смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) для обработки стекла (остальное – вода)

Номер состава	Компонент	Состав	Номер состава	Компонент	Состав
1	Карбонат натрия Нитрат натрия	0,2-0,5 0,2-1,0	3	Триэтаноламин Мылонафт Олеиновая кислота Смачиватель ОП7 или ОП10 Тринатрийфосфат	0,5 0,2-0,5 0,2 0,2 0,2
2	Триэтаноламин Нитрат натрия	0,7-1,0 0,25-0,3			
4	Триэтаноламин Нитрат натрия или мылонафт Глицерин	0,5-1,8 0,25-0,6 До 6	6	Вазелин Препарат ОС-20 ДЦУ	0,2-0,4 0,15-0,4 0,2-0,4
5	Трансформаторное масло Препарат ОС-20 Дициандиамид-формальдегидная смола (ДЦУ) Серная кислота	0,65-0,95 0,4-0,8 0,3 0,3	7	Эмульсол Э-2; Э-3 Нитрат натрия	4-5 1,5-2,0
			8	Эмульсол НГЛ-205	3-5
			9	Эмульсол СДМУ-2	3-5
			10	Эмульсол ЭМУС	3-5

27. Применяемость составов СОЖ (по номерам) по видам технологических процессов обработки стекла

Вид технологического процесса	Номера составов СОЖ
Обработка кромок автомобильного, зеркального и технического стекла	1, 2, 3, 8, 9
Круглое, наружное, плоское шлифование периферией круга фасонных изделий из стекла	1, 2, 4, 7, 8, 9
Плоское шлифование торцом круга	1, 2, 3, 7
Обработка изделий сортовой посуды (ручная)	5
То же (машинная)	1, 2, 6, 7, 10
Резка стекла	1, 2, 7
Сверление стекла	1, 2, 7, 9

28. Составы СОЖ, %, для ручной и механизированной обработки

Компонент	Вид обработки	
	Ручная	Механизированная
Трансформаторное масло	0,65-0,95	-
Вазелин	-	0,2-0,4
Препарат ОС-20 (смесь полиэтиленгликолевых эфиров высших жирных спиртов)	0,4-0,8	0,15-0,4
Дициандиамидформальдегидная смола (ДЦУ)	0,3	0,2-0,4
Серная кислота	0,3	-
Вода	Остальное	

29. Шероховатость *Ra* обработанной поверхности стекла при различных связках и зернистостях кругов

Связка	Зернистость	Шероховатость *Ra*, мкм
Металлическая	200/160-160/125	2,5-2,00
	160/125-125/100	1,6-1,25
	125/100-100/80	1,25-1,00
	100/80-80/63	1,00-0,80
	80/63-50/40	0,80-0,63
Органическая	40/28-28/20	0,40-0,20
	20/14-10/7	0,100-0,050

30. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от концентрации алмазов в инструменте

Вид шлифования	Зернистость круга	Значения *Ra* (мкм) при концентрации алмазов в круге			
		25	50	75	100
Обдирочное	200/160-125/100	2,5	2,0	1,6	1,25
Получистовое	125/100-80/63	1,25	1,00	0,90	0,80
Чистовое	80/63-50/40	0,80	0,75	0,70	0,63
Доводочное	40/28-28/20	0,20	0,25	0,32	0,40
»	20/14-10/7	0,050	0,063	0,080	0,100

31. Зависимость величины "трещиноватого" слоя от зернистости алмазного порошка (применительно к порошку марки АС6)

Величина "трещиноватого" слоя *H*, мкм	Зернистость алмазного порошка
20-25	50/40
35-40	80/63
45-50	100/80
50-60	125/100
75-75	160/125
80-90	200/160
90-100	250/200
100-120	315/250

щие увеличение расхода алмазов. Для обработки неметаллических материалов целесообразно применять алмазные круги на связках с малыми коэффициентами трения, например МО4, МЖ, МТ.

Оптимальная скорость резания при обработке стекла и подобных материалов составляет величину порядка 25-30 м/с, которой следует придерживаться при назначении режимов обработки. Например, шлифование изделий на круглошлифовальных станках выполняют со скоростью 20-30 м/с, резку отрезными кругами 40-50 м/с, сверление кольцевыми сверлами 3,0-8,0 м/с, торцовое шлифование плоских поверхностей 15-20 м/с.

С ростом поперечной и продольной подач повышается производительность обработки, однако увеличивается шероховатость обработанной поверхности и снижается срок службы инструмента. Глубину резания и продольную подачу следует снижать при увеличении площади контакта инструмента с изделием, а также для повышения качества обработки.

В табл. 32 указаны режимы алмазного сверления стекла. Среди конструкционных материалов на основе стекла все большее распространение получают стеклокристаллические (ситаллы), стеклокерамические и иные материалы. В табл. 33-36 приводятся режимы их шлифования.

32. Режимы сверления, характеристики алмазных сверл и показателей процессов при сверлении стекла

Марка алмаза	Характеристики сверл		Режимы сверления		Показатели процесса			
	Зернистость	Концентрация	Усиление подачи P, Н	Скорость резания v, м/с	Производительность Q, г/мин	Удельный расход алмазов q, мг/г	Момент резания, M, Нм	Температура на торце сверла, °С
А2	125/100	100	210	1,57	6,6	0,027	27,0	130
А2	125/100	100	210	2,83	11,0	0,020	27,0	188
А2	125/100	100	310	2,83	15,4	0,036	52,5	310
А2	250/200	100	310	2,23	14,6	0,030	40,8	130
АС6	125/100	150	210	2,83	8,1	0,042	36	278
АС6	200/160	150	260	1,57	12,3	0,020	36	220

33. Режимы шлифования, характеристика круга при наружном шлифовании ситаллов

Характеристика круга			Режимы шлифования				Показатели процесса			
Зернистость	Связка	Концентрация	Скорость круга $v_к$, м/с	Скорость изделия $v_{изд}$, м/мин	Подача S, м/мин	Глубина резания t, мм/ход	Температура $T_{ср}$, °С	Усилие резания P_y, Н	Удельный расход алмазов q, мг/г	Шероховатость поверхности Ra, мкм
125/100-100/80	Металлическая	150	30	30	1,0	0,05	252	142	1,060	1,25-0,63
100/80-63/50	»	150	30	30	0,7	0,01	141	49,3	0,482	0,63-0,32
63/50-40/28	Органическая	100	40	40	0,5	0,005	76	16,1	1,370	0,32-0,160
20/14-14/10	Керамическая	100	40	50	0,3	0,001	81	8,9	0,670	0,160-0,080
10/7-5/3	»	75	40	70	0,3	0,001	101	11,5	0,945	0,080-0,040

34. Режимы торцового шлифования неметаллических материалов

Обрабатываемый материал	Скорость круга $v_к$, м/с	Скорость перемещения стола		Давление, МПа	Глубина резания, t, мм	Вертикальная подача $S_в$, мм/мин
		м/с	об/мин			
Ситаллы	50-70	2-3	-	0,6-1,0	0,1-0,15	-
Керамика	50-70	2-3	-	1,2-1,5	0,15-0,3	-
Стекло оптическое, техническое	30-50	-	30	-	-	0,6-0,9

35. Режимы круглого шлифования стеклокерамических материалов

Обрабатываемый материал	Характеристика круга				Режимы обработки				Шероховатость Ra, мкм
	Марка	Зернистость	Связка	Концентрация	Скорость круга $v_к$, м/с	Скорость изделия $v_{изд}$, м/мин	Продольная подача $S_{пр}$, м/мин	Глубина резания t, мм/ход	
Ситалл	АС6	200/160-160/125	М4						
			М1	150	30	30	1,0	0,05	1,25-0,63
	АС6	80/63-50/40	МК						
			М1	100	40	40	0,5	0,005	0,32-0,160
Техническое стекло	АС6	125/100-80/63	М1	50	40	40	0,8	0,025	0,63-0,32
Керамика	АС16	80/63	М1	100	30	50	0,7	0,015	1,125-0,63

36. Режимы плоского шлифования деталей из неметаллических материалов

Обрабатываемый материал	Шероховатость поверхности Ra, мкм	Характеристика кругов		Режимы обработки			
		Марка алмазов	Зернистость	Скорость круга $v_к$, м/с	Продольная подача $S_{пр}$, м/мин	Поперечная подача $S_{поп}$, мм/ход	Глубина шлифования t, мм
Стекло, ситалл и подобные материалы микротвердостью до 1000 Керамика, кварц	2,5-1,25	АС15, АС6	315/250-200/160	25-30	12-15	0,9-1,3	0,3-0,4
	1,25-0,32	АС15, АС6	80/63-50/40		10-12	0,7-0,9	0,1-0,2
	0,63-0,160	АС6, АСМ	50/40-40/28		8-10	0,5-0,7	0,04-0,06
	0,32-0,080	АСМ	40/28-20/14		5-6	0,4-0,5	0,02-0,03
	0,160-0,040	АСМ	20/14-7/5		3-4	0,2-0,3	0,05-0,015
	2,5-0,32	А2-А5	200/160-63/50		8-10	0,6-0,9	0,1-0,2
	0,63-0,160	АС15, АС6 АС15, АС6 АСМ	63/50-40/28	30-35	8-10	0,4-0,6	0,03-0,05
	0,32-0,080	АСМ	40/28-20/14		5-6	0,3-0,4	0,015-0,02
	0,160-0,040	АСМ	20/14-7/5		3-4	0,2-0,3	0,0025-0,01

Характеристики алмазных кругов, применяемых при торцовом шлифовании стекла и неметаллических материалов на основе керамики, приведены в табл. 37.

Особенностью алмазного торцового шлифования неметаллических материалов является съем больших (1 мм и более) припусков при черновой обработке.

Обработку ферритовых магнитов, сердечников, керамических деталей выполняют за одну операцию на высокопроизводительных станках для торцового шли-

37. Характеристика инструмента при торцовом шлифовании неметаллических материалов

Обрабатываемый материал	Шлифование	Характеристика инструмента			
		Марка алмазов	Зернистость	Концентрация (условное обозначение)	Связка
Ситаллы	Обдирочное	АС6	108/80-63/50	100-150	М1, МО4, МО8
	Чистовое	АС6, АСМ	63/50-40/28	100	М1, МО8
Керамика	Обдирочное	АС6	100/80-80/63	100	М1
Стекло оптическое, техническое	»	А2-А5, АС15 АС6	250/200-50/40	50	М1, МО4 С22
	Чистовое	АМ, АСМ	40/28-10/7	25-50	М1

фования с получением параметра шероховатости поверхности $Ra \leq 1{,}25 \div 0{,}63$ мкм, плоскостности деталей до 0,1 мм. К подложкам для интегральных схем, ситалловым подложкам, стеклопластикам для фотошаблонов предъявляют более высокие требования: параметр шероховатости $Ra = 0{,}010 \div 0{,}008$ мкм, отклонение от плоскостности не выше 1-2 мкм по всей площади детали. Указанные детали обрабатывают за несколько операций.

Глава 2
УПРОЧНЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ

Основные процессы упрочнения

Ниже приведены данные о процессах, обеспечивающих повышение эксплуатационной надежности изделий из древесины. Основные из них – сушка, консервирование и огнезащита – не изменяют биологическую структуру исходного материала, в отличие от процессов, в которых древесина участвует лишь в качестве одного из компонентов при создании принципиально отличающихся от естественной древесины древесных пластиков с заранее заданными свойствами. Поскольку комплекс таких свойств, как правило, ориентирован на максимально возможное удовлетворение конструктивных требований к изделию или его элементу, изготовленному из древесных пластиков, то в практике преимущественно не требуется проведение каких-либо дополнительных процедур по упрочнению этих материалов.

Для создания необходимых свойств древесины ее подвергают сушке, консервированию антисептиками и химической защите от горения.

Сушкой называется процесс удаления из материала влаги путем ее испарения. Сушка древесины – один из важнейших этапов любого технологического процесса деревообработки. Сырая древесина плохо обрабатывается, склеивается, имеет меньшую прочность по сравнению с сухой древесиной, а также подвержена загниванию, формо- и размероизменяемости. Поэтому к основным технологическим целям сушки древесины относят: предупреждение формо- и размероизменяемости деталей; предохранение от загнивания; уменьшение массы при одновременном повышении прочности; улучшение качества склеивания и отделки.

Консервированием называется обработка древесины, на длительное время повышающая ее стойкость к поражению дереворазрушающими грибами и насекомыми. С этой целью в древесину вводят защитные вещества – антисептики.

Сушка предохраняет древесину от загнивания лишь при условии, если она во время эксплуатации не подвергается повторным увлажнениям. Если древесину используют в изделиях и сооружениях, находящихся на открытом воздухе или в грунте, ее стойкость против загнивания может быть обеспечена только консервированием.

Огнезащита – предохранение сооружений, в которых используется древесина, от пожаров путем пропитывания древесины специальными огнезащитными составами – *антипиренами.*

Сушка древесины

Правильное проведение сушки невозможно без знания начальной влажности пиломатериалов и контроля их текущей влажности. Для этого из партии пиломатериалов, подлежащих сушке, отбирают несколько досок, из которых вырезают контрольные образцы и секции влажности.

Контрольный образец длиной 1-1,2 м выпиливают из доски, отступив от торца $\geq$ 0,3 м. Немедленно после выпиливания контрольный образец и смежные с ним

секции влажности взвешивают. Затем образцы укладывают в штабель материала, подлежащего сушке. По секциям определяют начальную влажность каждого образца, за которую принимается средняя величина из влажности обеих секций.

Идея использования контрольных образцов влажности состоит в том, чтобы, определив предварительно косвенным путем массу абсолютно сухого образца, в нужное время вытащив из штабеля и взвесив этот образец, подсчитать в процентах его текущую влажность по формуле

$$W_{\text{тек}} = 100\,(M_{\text{тек}} - M_0)/M_0,$$

где $M_{\text{тек}}$ – масса образца в момент определения текущей влажности, г; M_0 – масса образца в абсолютно сухом состоянии, г.

Массу абсолютно сухого образца определяют по формуле

$$M_0 = 100\,M_{\text{н}}/(100 + W_{\text{н}}),$$

где $M_{\text{н}}$ – начальная масса контрольного образца перед закладкой его в штабель, г; $W_{\text{н}}$ – начальная влажность образца, определяемая при помощи секций влажности, %.

Начальную влажность образца из секции в процентах определяют по формуле

$$W_{\text{н}} = 100(m_{\text{н}} - m_0)/m_0\,,$$

где m – начальная масса секции при начальной влажности, г; m_0 – масса секции в абсолютно сухом состоянии, г.

Текущую влажность контрольных образцов, особенно на последних этапах процесса сушки, можно определять электровлагомером.

Выбор режима сушки. После установления начальной влажности материала, подлежащего высушиванию, необходимо выбрать режим сушки. Режимом называется расписание состояния воздуха (температуры и влажности) в сушильной камере. Это расписание координируется по влажности древесины.

Различают режимы низко- и высокотемпературного процесса сушки. Первые предусматривают использование в качестве сушильного агента влажного воздуха при температуре ниже 100 °С. Температура выше 100 °С допускается в отдельных случаях на последней стадии процесса. Вторые предусматривают сушку нагретым паром атмосферного давления при температуре выше 100 °С.

Для низкотемпературного процесса установлены три категории режимов по их влиянию на свойства древесины:

- мягкие режимы, при которых полностью сохраняются прочность и естественный цвет древесины;
- нормальные режимы, при которых сохраняется прочность, но возможно незначительное изменение цвета древесины;
- форсированные режимы, при которых сохраняются прочность на изгиб, растяжение и сжатие, но на 15-20% снижается прочность на скалывание и раскалывание и возможно потемнение древесины.

Режимы низкотемпературного процесса сушки в паровоздушных камерах периодического действия для пиломатериалов хвойных пород приведены в табл. 1. В качестве определяющих параметров воздуха приняты температура t, степень насыщенности φ и психрометрическая разность $\Delta t = t - t_{\text{м}}$, где $t_{\text{м}}$ – температура

1. Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины сосны, ели, пихты, кедра

Средняя влажность древесины, %	Параметры режима	Номер режима							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		Толщина пиломатериалов, мм							
		2	св. 22 до 25	св. 25 до 32	св. 32 до 40	св. 40 до 50	св. 50 до 60	св. 60 до 75	св. 75 до 100
***Мягкие режимы* (М)**									
> 35	t, °С	57	57	57	55	55	55	52	52
	Δt, °С	6	5	4	4	4	4	3	2
	φ	0,73	0,77	0,81	0,81	0,81	0,81	0,84	0,90
35-20	t, °С	61	61	61	58	58	58	55	55
	Δt, °С	10	9	8	7	7	7	6	5
	φ	0,59	0,62	0,66	0,69	0,69	0,69	0,72	0,76
< 20	t, °С	77	77	77	75	75	75	70	70
	Δt, °С	26	25	24	24	24	24	21	20
	φ	0,27	0,29	0,31	0,30	0,30	0,30	0,33	0,35
***Нормальные режимы* (Н)**									
> 35	t, °С	83	79	79	75	73	71	64	55
	Δt, °С	9	7	6	5	5	4	3	2
	φ	0,68	0,73	0,77	0,80	0,80	0,83	0,86	0,90
35-25	t, °С	88	84	84	80	77	75	68	58
	Δt, °С	14	12	11	10	9	8	7	5
	φ	0,55	0,59	0,62	0,64	0,66	0,70	0,71	0,77
< 25	t, °С	110	105	105	100	96	94	85	75
	Δt, °С	36	33	32	30	28	27	24	22
	φ	0,24	0,26	0,27	0,29	0,31	0,32	0,33	0,34
***Форсированные режимы* (Ф)**									
> 35	t, °С	94	92	92	90	87	83	73	-
	Δt, °С	11	10	8	7	6	5	4	-
	φ	0,65	0,67	0,73	0,75	0,78	0,80	0,84	-
35-25	t, °С	99	97	97	95	92	88	78	-
	Δt, °С	16	15	13	12	11	10	9	-
	φ	0,54	0,55	0,60	0,62	0,64	0,66	0,66	-
< 25	t, °С	125	123	123	120	115	110	98	-
	Δt, °С	42	41	39	37	36	32	29	-
	φ	0,21	0,22	0,24	0,25	0,25	0,29	0,30	-

смоченного термометра. Предусматривается изменение состояния воздуха в процессе сушки тремя ступенями. Переход со ступени на ступень производится при определенной, так называемой переходной, влажности древесины. Для хвойных пород установлена переходная влажность 35 и 25%.

При начальной влажности ниже 35% первую ступень режима не используют.

При сушке до транспортной влажности не используют третью ступень режима.

Режим сушки выбирают в зависимости от породы, размеров (толщины) и назначения пиломатериалов. По назначению устанавливают одну из четырех категорий качества сушки.

I, II, III категории качества предусматривают сушку пиломатериалов до средней эксплуатационной влажности готовых изделий (7-10%). При этом они должны обеспечивать:

I категория – возможность механической обработки и сборки деталей для высокоточных составных частей изделий (некоторые соединения механики клавишных инструментов, точное машиностроение и приборостроение, деревянные строительные клееные несущие конструкции, производство моделей, лыж и т. п.);

II категория – механическую обработку и сборку деталей для ответственных составных частей изделий (мебельное производство, футляры для радио- и телеаппаратуры, корпуса клавишных инструментов, столярно-строительные изделия, деревянные строительные ограждающие конструкции, пассажирское вагоно- и автостроение и т. п.);

III категория – механическую обработку и сборку деталей для менее ответственных составных частей изделий (погонажные столярно-строительные изделия, товарное вагоностроение, сельхозмашиностроение, рядовая тара и т. п.).

По нулевой категории качества предусматривается сушка пиломатериалов (заготовок), в том числе экспортных, до транспортной влажности (19-20%).

Рекомендации по выбору категории режима сушки пиломатериалов хвойных пород даны в табл. 2.

Обозначение конкретного режима состоит из номера, характеризующего толщину, и прописной буквы (М, Н или Ф), указывающей категорию режимов. Например, нормальный режим сушки досок или заготовок толщиной 40 мм обозначается 4-Н.

Режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов лиственных пород приведены в табл. 3.

Режим, применяемый для сушки пиломатериалов конкретной лиственной породы и размера, обозначается номером (от 2 до 10), показывающим уровень температуры, и буквенным индексом (от А до Д), характеризующим степень насыщенности воздуха, например 3-Б, 8-В.

Режимы, приведенные в табл. 3, предусматривают так же, как и для хвойных пород, трехступенчатое изменение параметров воздуха при переходной влажности древесины 30 и 20%.

Рекомендации по выбору режимов, приведенных в табл. 3, в зависимости от породы и толщины пиломатериалов даны в табл. 4.

Определение продолжительности сушки. Для укрупненных производственных расчетов продолжительности сушки рекомендуется табличный метод. В табл. 5 приводится заранее рассчитанная "исходная" продолжительность ($\tau_{исх}$) сушки пиломатериалов заданной породы и размеров от начальной влажности

2. Выбор категории режима сушки пиломатериалов хвойных пород

Категория качества сушки	Конечная влажность древесины, %	Рекомендуемые категории режима сушки
0	19-20	Мягкие (М), нормальные (Н)
I	6-8	Нормальные (Н)
II	6-10	Нормальные (Н), форсированные (Ф), высокотемпературные (В)
III	8-15	То же

3. Режимы низкотемпературного процесса сушки лиственных пород

Индекс режима	Средняя влажность древесины, %	Номер режима и параметры (t, °С; Δt, °С; φ) воздуха														
		2			3			4			5			6		
		t	Δt	φ	t	Δt	φ	t	Δt	φ	t	Δt	φ	t	Δt	φ
А	> 30	82	3	0,88	75	3	0,87	69	3	0,87	63	2	0,91	57	2	0,90
	30-20	87	6	0,78	80	6	0,77	73	6	0,76	67	5	0,78	61	5	0,78
	< 20	108	27	0,35	100	26	0,35	91	24	0,36	83	22	0,36	77	21	0,36
Б	> 30	82	4	0,84	75	4	0,84	69	4	0,83	63	3	0,86	57	3	0,85
	30-20	87	8	0,72	80	8	0,70	73	7	0,72	67	6	0,75	61	6	0,74
	< 20	108	29	0,32	100	28	0,32	91	25	0,34	83	23	0,34	77	22	0,34
В	> 30	82	6	0,77	75	5	0,80	69	5	0,79	63	4	0,82	57	4	0,81
	30-20	87	10	0,66	80	9	0,66	73	8	0,69	67	7	0,71	61	7	0,70
	< 20	108	31	0,30	100	29	0,31	91	26	0,33	83	24	0,32	77	23	0,32
Г	> 30	82	8	0,71	75	7	0,73	69	6	0,76	63	5	0,78	57	5	0,77
	30-20	87	12	0,60	80	11	0,61	73	10	0,63	67	9	0,64	61	9	0,62
	< 20	108	33	0,27	100	31	0,28	91	28	0,30	83	26	0,29	77	25	0,29
Д	> 30	82	10	0,65	75	9	0,66	69	8	0,68	63	7	0,70	57	6	0,73
	30-20	87	14	0,55	80	13	0,55	73	12	0,56	67	11	0,58	61	10	0,59
	< 20	108	35	0,24	100	33	0,25	91	30	0,26	83	27	0,28	77	26	0,27

Индекс режима	Средняя влажность древесины, %	Номер режима и параметры (t, °С; Δt, °С; φ) воздуха											
		7			8			9			10		
		t	Δt	φ	t	Δt	φ	t	Δt	φ	t	Δt	φ
А	> 30	52	2	0,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	30-20	55	4	0,81	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	< 20	70	20	0,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Б	> 30	52	3	0,84	47	2	0,90	42	2	0,89	38	2	0,88
	30-20	55	5	0,76	50	5	0,75	45	4	0,79	41	4	0,77
	< 20	70	21	0,33	62	18	0,36	57	17	0,36	52	16	0,36
В	> 30	52	4	0,80	47	3	0,84	42	3	0,83	38	3	0,82
	30-20	55	7	0,68	50	6	0,70	45	5	0,74	41	5	0,72
	< 20	70	22	0,31	62	19	0,33	57	18	0,34	52	17	0,33
Г	> 30	52	5	0,75	47	4	0,79	42	4	0,77	38	4	0,76
	30-20	55	8	0,64	50	7	0,66	45	6	0,69	41	6	0,67
	< 20	70	23	0,29	62	21	0,29	57	20	0,29	52	18	0,30
Д	> 30	52	6	0,71	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	30-20	55	9	0,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	< 20	70	24	0,27	-	-	-	-	-	-	-	-	-

60% до конечной влажности 12% нормальным режимом в камерах с циркуляцией средней интенсивности (скорость воздуха в штабеле 1 м/с).

Ожидаемая продолжительность сушки τ (в часах) при отклонении заданных условий от исходных определяется умножением на коэффициенты, учитывающие категорию режима сушки $A_р$, интенсивность циркуляции $A_ц$, требуемое качество сушки $A_к$, начальную и конечную влажность $A_в$, длину материала $A_д$:

$$\tau = \tau_{исх} A_р A_ц A_к A_в A_д.$$

Значения $A_Р$ и $A_К$ приведены ниже:

Группа режимов	Ф	Н	М
$A_Р$	0,8	1,0	1,7
Категория качества	0 I	II	III
$A_К$	1,00 1,2	1,15	1,05

4. Выбор режимов низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов лиственных пород

Порода	Категория режима	Толщина пиломатериалов, мм							
		до 22	св. 22 до 32	св. 32 до 40	св. 40 до 50	св. 50 до 60	св. 60 до 70	св. 70 до 75	св. 75 до 100
Береза, ольха	М	6-Д	6-Г	6-В	6-В	7-В	8-В	-	-
	Н	3-Д	4-Г	4-В	5-В	6-Б	7-Б	8-Б	9-Б
	Ф	2-Д	3-Г	3-В	4-В	-	-	-	-
Осина, липа, тополь	Н	3-Г	3-Б	4-Б	5-В	6-В	7-В	8-В	9-В
	Ф	2-Г	2-Б	3-Б	4-В	-	-	-	-
Бук, клен	Н	3-В	4-В	5-В	5-Б	6-Б	7-А	8-Б	-
	Ф	2-Г	3-В	4-В	-	-	-	-	-
Дуб, ильим	Н	5-Г	6-В	6-Б	7-Б	8-Б	9-В	10-Б	-
	Ф	3-Г	4-В	5-В	-	-	-	-	-
Орех, граб, ясень	Н	5-В	5-Б	6-Г	6-Б	7-В	8-В	9-В	-
	Н	6-В	6-А	7-Б	8-В	8-Б	9-В	10-В	-

5. Исходная продолжительность сушки пиломатериалов, ч, в камерах периодического действия при низкотемпературном процессе

Толщина пиломатериалов, мм	Ширина пиломатериалов, мм				Толщина пиломатериалов, мм	Ширина пиломатериалов, мм			
	80-100	110-130	140-180	более 180		80-100	110-130	140-180	более 180
Сосна, ель, пихта, кедр					Осина, липа, тополь				
До 16	26	27	27	27	До 16	33	34	34	34
19	32	33	33	33	19	39	40	40	40
22	39	39	39	39	22	47	53	54	54
25	53	54	55	55	25	64	66	67	68
32	68	72	73	73	32	84	8	89	91
40	84	86	88	88	40	93	96	99	102
50	99	100	104	105	50	109	116	119	123
60	114	122	125	130	60	128	140	152	164
70	147	161	178	194	75	253	282	311	443
75	156	177	197	218					
100	340	354	379	432					
Бук, клен, береста, ясень, ильим					Береза, ольха				
До 16	61	63	63	63	До 16	37	38	39	39
19	71	73	73	74	19	47	47	48	48
22	80	81	82	83	22	53	54	55	55
25	96	99	101	102	25	78	81	83	84
32	115	118	120	122	32	88	91	92	94
40	140	152	159	167	40	100	101	105	107
50	199	225	239	255	50	130	141	149	158
60	296	339	367	396	60	187	213	231	249
75	591	657	728	805	75	377	420	463	514

Продолжение табл. 5

Толщина пиломатериалов, мм	Ширина пиломатериалов, мм				Толщина пиломатериалов, мм	Ширина пиломатериалов, мм			
	80-100	110-130	140-180	более 180		80-100	110-130	140-180	более 180
Лиственница					Дуб, орех, граб				
До 16	64	67	68	68	До 16	85	87	87	88
19	74	77	77	77	19	94	96	96	97
22	83	86	87	87	22	104	105	106	107
25	91	92	93	94	25	132	136	138	140
32	104	108	110	113	32	193	206	204	221
40	144	157	166	175	40	269	293	307	321
50	224	256	279	304	50	431	488	520	551
60	304	361	400	443	60	679	777	841	905
70	431	521	585	635	75	1086	1209	1340	1485
75	466	574	650	737					

6. Значение коэффициента $A_ц$

Произведение $\tau_{исх} \cdot A_р$, ч	Камеры с принудительной циркуляцией			Камеры с естественной циркуляцией
	1 – большой интенсивности	2 – средней интенсивности	3 – слабой интенсивности	
20	0,65	1,00	1,80	2,60
40	0,70	1,00	1,70	2,30
60	0,75	1,00	1,60	2,00
80	0,80	1,00	1,45	1,75
100	0,85	1,00	1,35	1,55
140	0,90	1,00	1,15	1,30
180	0,93	1,00	1,10	1,15
200 и более	0,95	1,00	1,05	1,10

7. Значение коэффициента $A_в$

Начальная влажность $W_н$, %	Конечная влажность $W_к$, %											
	22	20	18	16	14	12	11	10	9	8	7	6
120	1,07	1,12	1,18	1,25	1,33	1,43	1,49	1,55	1,61	1,68	1,76	1,86
110	1,00	1,06	1,12	1,20	1,28	1,37	1,43	1,49	1,55	1,62	1,71	1,81
100	0,94	1,00	1,06	1,14	1,22	1,31	1,37	1,43	1,50	1,57	1,65	1,75
90	0,87	0,93	1,00	1,07	1,16	1,25	1,30	1,36	1,43	1,51	1,58	1,68
80	0,80	0,86	0,93	1,00	1,09	1,18	1,23	1,29	1,35	1,43	1,51	1,61
70	0,72	0,78	0,84	0,92	1,00	1,10	1,15	1,21	1,27	1,35	1,43	1,52
65	0,67	0,74	0,80	0,87	0,96	1,05	1,16	1,23	1,30	1,38	1,48	1,48
60	0,62	0,68	0,75	0,82	0,91	1,00	1,05	1,11	1,18	1,25	1,33	1,43
55	0,57	0,63	0,69	0,77	0,85	0,94	1,00	1,06	1,12	1,20	1,28	1,38
50	0,51	0,57	0,63	0,71	0,79	0,89	0,94	1,00	1,06	1,14	1,22	1,32
45	0,44	0,50	0,57	0,64	0,73	0,82	0,87	0,93	1,00	1,07	1,15	1,25
40	0,37	0,43	0,49	0,57	0,65	0,75	0,80	0,86	0,93	1,00	1,08	1,18
35	0,29	0,35	0,43	0,49	0,57	0,66	0,72	0,78	0,84	0,92	1,00	1,10
30	0,19	0,25	0,32	0,39	0,48	0,57	0,62	0,68	0,75	0,82	0,90	1,00
28	0,15	0,21	0,27	0,35	0,43	0,53	0,58	0,64	0,71	0,78	0,86	0,96
26	0,10	0,16	0,23	0,31	0,38	0,48	0,54	0,59	0,66	0,73	0,82	0,91
24	0,06	0,11	0,18	0,27	0,33	0,43	0,49	0,54	0,61	0,68	0,77	0,86
22	-	0,06	0,13	0,22	0,28	0,38	0,43	0,49	0,56	0,63	0,71	0,81
20	-	-	0,07	0,14	0,22	0,32	0,37	0,43	0,49	0,57	0,65	0,75

Коэффициент $A_ц$ находят по табл. 6 в зависимости от произведения $\tau_{исх} \cdot A_р$ и типа камер по скорости циркуляции.

Коэффициент $A_в$, зависящий от начальной $W_н$ и конечной $W_к$ влажности, определяют по табл. 7.

Коэффициент $A_д$ для пиломатериалов равен 1.

Пропитка древесины

По свойствам пропитываемости породы сухой древесины разделяют на группы: легкопропитываемые – заболонь березы, бука и сосны; умереннопропитываемые – кедр, ольха, осина, заболонь граба, дуба, клена, липы и лиственницы европейской, ядро сосны; труднопропитываемые – ель, лиственница сибирская, пихта, ядро березы, бука, вяза, дуба, лиственницы европейской и ясеня.

Химические защитные вещества, используемые для пропитки древесины, можно подразделить на группы по трем основным признакам: по растворимости – на водорастворимые, растворимые в органических растворителях (органикорастворимые) и антисептические масла; по направленности действия – на антисептики, антипирены и биозащитные вещества; по вымываемости – на легковымываемые, вымываемые, трудновымываемые и невымываемые.

К водорастворимым защитным веществам относятся фторсодержащие антисептики: кремнефторид аммония (КФА) и фторид натрия (ФН); хромосодержащие антисептики: хромомедный (ХМ-11), хромомеднофтористые (ХМФ и ХМК), хромомеднохлороцинковый (ХМХЦ), хлорофторомышьяковые ("Доналит УА" и "Доналит УАЛЛ"); фенолсодержащие: пентахлорфенолят натрия (ПХФН).

Антипирены этой группы представляют собой чаще всего вещества на основе фосфорнокислых и сернокислых препаратов – сульфат аммония и двузамещенный фосфат аммония.

К биоогнезащитным средствам относятся препараты комбинированного действия, содержащие как антисептики, так и антипирены. Препарат ББ содержит тетраборат натрия и борную кислоту.

Препараты ПББ и ПБС содержат в качестве антисептической основы пентахлорфенолят натрия, а препарат ХМББ – антисептик ХМ-11. В качестве компонентов, повышающих стойкость древесины к возгоранию, к этим антисептикам добавляют тетраборат натрия и борную кислоту, а в препарат ПБС, кроме того, – карбонат натрия.

К органикорастворимым защитным средствам относятся препараты на основе пентахлорфенола (ПХФ) и нафтената меди (НМ), а к антисептическим маслам – каменноугольные (КМ), антраценовые (АМ) и сланцевые (СМ) пропиточные масла.

Для защиты древесины от биоразрушений в трудных условиях службы общее поглощение ею антисептика может не превышать 20 кг/м^3. Для достаточно высокой защиты древесины от возгорания требуется поглощение ею антипиренов не менее 40-60 кг/м^3.

Составы комплексных биоогнезащитных препаратов приведены в табл. 8.

Для пропитки деревянных плотно собранных конструкций или элементов, работающих в условиях, когда к универсальности свойств пропитки добавляется требование сохранения первоначального объема конструкции, рекомендуется использовать препараты на основе пентахлорфенола (ПХФ). Препараты этой

группы широко распространены и достаточно эффективны как антисептическое и комплексное средство защиты древесины.

Технический ПХФ – сиренево-серое вещество, мелкокристаллическое или комковатое, нелетучее, слегка пылящее. Препараты на основе ПХФ разделяют на класс ПЛ – с использованием в качестве растворителей относительно легких нефтяных продуктов и класс ПМ – с использованием относительно тяжелых нефтяных продуктов. Составы препаратов класса ПЛ на основе ПХФ приведены в табл. 9, а препаратов класса ПМ – в табл. 10. Препараты класса ПЛ хорошо проникают в древесину и предназначены в основном для скоростной пропитки строительных конструкций, в том числе старых деревянных построек без их разборки, а также тары и деталей машин.

8. Составы комплексных биоогнезащитных препаратов для пропитки древесины

Тип препарата	Состав, % (мас. доля)						
	ПХФН	Бура	Кислота борная	Сода кальцинированная	Бихромат натрия	Сульфат меди	Ледяная уксусная кислота
ПББ	10-50	25-45	25-45	-	-	-	-
ПБС	8-40	-	30-45	30-45	-	-	-
ХМББ	-	25-40	25-40	-	10-25	10-25	0,2-1

Обозначения. ПББ – препарат на основе бора и борной кислоты; ПБС – борной кислоты и соды; ХМББ – бихрома, сульфата меди, бора и борной кислоты; ПХФН – пентахлорфенолят натрия.

9. Составы препаратов класса ПЛ на основе ПХФ для комплексной биоогнезащитной пропитки древесины

Тип препарата	Компоненты растворителя	Соотношение компонентов растворителя при содержании ПФХ, % (мас. доля)				
		2	3	4	5	6
ПЗС	Зеленое масло	8	13	17	21	25
	Уайт-спирит	90	84	79	74	69
ПЗТ	Зеленое масло	8	13	17	21	25
	Дизельное топливо	90	84	79	74	69
ПКС	Каменноугольное масло	7	11	14	18	22
	Уайт-спирит	91	86	82	77	72
ПКТ	Каменноугольное масло	7	11	14	18	22
	Дизельное топливо	91	86	82	77	72
ПОС	Олифа "Оксоль"	11	16	22	28	32
	Уайт-спирит	87	81	74	67	62
ПНРС	Нефтяной растворитель	17	25	33	-	-
	Уайт-спирит	81	72	63	-	-
ПНРТ	Нефтяной растворитель	17	25	33	-	-
	Дизельное топливо	81	72	63	-	-
ПЗВ	Зеленое масло	8	13	17	21	25
	Растворитель ВГ	90	84	79	74	69

Примечания:

1. Остальное – водоотталкивающие и окрашивающие компоненты, если в этих свойствах есть необходимость. Если такой необходимости нет, то пропорции сохраняются до 100%.
2. Зеленое масло – продукт переработки нефти.

10. Составы препаратов класса ПМ на основе ПХФ для комплексной биоогнезащитной пропитки древесины

Тип препарата	Компоненты	Количество компонента при содержании ПХФ, % (мас. доля)				
		2	3	4	5	6
ПСД	Специальное дизельное топливо	98	97	96	95	-
ПЗД	Зимнее дизельное топливо	98	97	-	-	-
ПЛД	Летнее дизельное топливо	98	97	-	-	-
ПЗ	Зеленое масло	98	97	96	95	94
ПНР	Нефтяной растворитель	98	97	96	95	94
ППМ	Нефтяное поглотительное масло	98	97	96	95	-
ПВ	Веретенное масло	98	97	-	-	-
ПКНР	Каменноугольное масло	-	30	-	-	-
	Нефтяной растворитель	-	67	-	-	-
ПЗП	Зеленое масло	8	13	17	21	25
	Петролатум	90	84	79	74	69

Препараты класса ПМ используют для пропитки древесины под давлением, например, шпал, свай, опор, деталей конструкций, находящихся на открытом воздухе. Эти препараты создают светлую окраску древесины. Они менее токсичны для человека и обеспечивают большую безопасность при работе в сравнении с иными препаратами, названными выше. При необходимости придания древесине только огнезащитных свойств, без усиления антигрибковой и иной биологической защиты, чаще употребляют препарат антипирен СД-11, безвредный для людей, достаточно дешевый, практически не ухудшающий физические и механические свойства древесины.

Состав 1 кг препарата СД-11 при 16%-ной концентрации: аммоний сернокислый $(NH_4)_2SO_4$ 0,08 кг, аммоний двузамещенный фосфорнокислый $(NH_4)_2HPO_4$ 0,08 кг, вода 0,84 кг.

Пропитку древесины осуществляют следующими способами:

- многократным нанесением состава на поверхность ручным или механическим способом кистью или опрыскивателем с промежуточным просушиванием или без него;
- непрерывным постоянным контактом древесины и пропиточной жидкости в ванне или с помощью наложения на поверхность древесины непроницаемой полиэтиленовой панели, внутренняя сторона которой создается гидрофобным материалом (фильтровальная бумага, вата, пр.) и постоянно смачивается раствором из питателя;
- инъекцией раствора в древесину с помощью специальных шприцев или специальных приспособлений под давлением до 0,3 МПа (3 атм);
- вакуумированием древесины и последующей подачей пропиточных растворов на ее поверхность при атмосферном давлении;
- окунанием и выдержкой в ванне после предварительного прогрева древесины паром или горячим воздухом;
- вакуумированием древесины и последующим насыщением ее поверхности защитным препаратом под давлением в автоклавах.

Определение качества пропитки. Качество пропитки характеризуется количеством поглощения антисептика и глубиной его проникновения.

Различают общее и чистое поглощение. Количество общего поглощения $П_0$, кг соли/м^3 древесины, определяют по формуле

$$П_0 = M_р C/100V,$$

где $M_р$ – масса раствора, введенного в древесину, кг; C – концентрация раствора антисептика, %; V – объем образца, м^3.

Количество чистого поглощения $П_ч$, кг соли/м^3 древесины, определяют по формуле

$$П_ч = M_р C/100V_{пр},$$

где $V_{пр}$ – объем пропитанной части образца, м^3.

Массу раствора, кг, введенного в древесину, определяют по формуле

$$M_р = M_к - M_н,$$

где $M_н$ и $M_к$ – масса образца, соответственно, до и после пропитки, кг.

Границу пропитанной зоны образцов определяют индикаторами, дающими цветную реакцию с применяемым антисептиком. Индикатором на фтористый натрий служит цирконализариновый лак, который следует приготовить за 15-20 мин до нанесения на поверхность древесины. Индикатор готовят путем смешения равных объемов двух растворов: 0,84%-ного водного раствора ализарина красного и 0,84%-ного раствора хлорокиси циркония в 10%-ной соляной кислоте. Оба раствора в отдельности могут храниться длительное время.

Через несколько минут после нанесения индикатора пропитанная зона окрашивается в желтый цвет.

Для установления границы пропитанной зоны из образца, примерно посередине его длины, выпиливают секцию (торцовый срез) толщиной 6-10 мм. На торцовую поверхность секции ватно-марлевым тампоном или кистью наносят индикатор. После появления желтой окраски границу окрашенной зоны очерчивают остро заточенным копировальным карандашом. Минимальную глубину пропитки замеряют линейкой (с погрешностью до 0,5 мм) в месте наименьшей ширины пропитанной зоны, перпендикулярно поверхности образца.

Объем пропитанной части образца, м^3, вычисляют по формуле

$$V_{пр} = F_{пр},$$

где $F_{пр}$ – площадь пропитанной зоны, м^2; l – длина образца, м.

Площадь пропитанной зоны образца определяют следующим образом. Контур поперечного сечения секции и границу пропитанной зоны перенести сначала на кальку, затем скопировать на миллиметровую бумагу и далее по клеткам подсчитать искомую площадь.

Качество пропитки применительно к столярно-строительным деталям считают удовлетворительным при следующих условиях:

- количество общего поглощения при применении фтористого натрия должно быть не менее 4-5 кг соли/м^3 древесины;

- глубина пропитки для древесины березы, бука, заболони сосны и кедра должна быть не менее 5 мм, а для древесины ели, пихты, ядра сосны и кедра – не менее 1,5-2 мм.

Глава 3
УПРОЧНЕНИЕ ПЛАСТМАСС МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ

Подготовка пластмасс к металлизации

Предварительная подготовка пластмассовых изделий перед металлизацией проводится для того, чтобы создать на поверхности шероховатость, обеспечить сцепление покрытия с основой. Операции предварительной подготовки неметаллов включают придание поверхности шероховатости, ее сенсибилизацию и активирование.

Шероховатость создается применяемыми раздельно или совместно механическими, химическими или физическими способами обработки поверхности.

Сенсибилизация – контактное осаждение на обрабатываемую поверхность хлористого олова, которое хорошо адсорбируется на поверхности многих неметаллов. Назначение процесса сенсибилизации – способствовать проведению следующей операции активирования.

Активирование – контактное осаждение на обрабатываемую неметаллическую поверхность (сенсибилизированную или несенсибилизированную) каталитического металлического слоя, на который можно методами химического восстановления осаждать различные металлопокрытия. Активирование обычно проводят в растворе солей палладия. Его ионы восстанавливаются гидроокисью двухвалентного олова, и металлические коллоидные частицы оседают на обрабатываемой поверхности, образуя центры катализа и кристаллизации.

В ряде случаев некоторые участки деталей приходится изолировать от контакта с раствором, например посадочные места и др. Такие участки тщательно очищают от загрязнений и покрывают кистью 2-3 слоями перхлорвиниловой эмали (ХВЭ-16, ХВЛ-21 и др.) или лака. Каждый слой сушат в течение 40-60 мин при комнатной температуре или в сушильном шкафу при 75 °С в течение 15-20 мин. Для изоляции на деталях отдельных участков можно использовать также ленту или трубки, жгуты и пробки (при изоляции отверстий) из полиэтилена низкого или высокого давления и другие подобные материалы.

Применявшуюся изоляцию удаляют после выгрузки деталей из ванны и соответствующего числа промывок. Для этого детали погружают на 8-10 мин в кипящую воду, после чего изоляционный слой снимается с них сплошной пленкой.

Для создания шероховатости на поверхности пластмассовые детали подвергают механической обработке пескоструйной или паропескоструйной обдувкой поверхности изделий абразивными материалами. Изделия из эпоксидных и полиэфирных смол обдувают 10-15 с при давлении 0,21-0,28 МПа, размер частиц 30-35 мкм, расстояние от сопла до изделия 15-20 см. Более прочные материалы подвер-

гают обдувке в режиме: давление 0,5-0,55 МПа, размер частиц 100-200 мкм, продолжительность 20-25 с. Затем обдувкой чистым воздухом удаляют остатки песка и пыли. Детали тщательно промывают и обезжиривают в растворе состава, г/л: кальцинированная сода 20, тринатрийфосфат 20, детергент ОП-9 или ОП-10 3, температура раствора t = 50÷60 °С, время выдержки в растворе τ = 10÷15 мин.

Химическую обработку поверхности деталей из пластмасс осуществляют травлением в серной кислоте, которая взаимодействует с большинством пластмасс. Применяют также двухкомпонентные смеси серной кислоты и хромового ангидрида, растворы с двухромовокислым калием (калиевый хромпак) и бихромат натрия, вводят поверхностно-активные вещества (ПАВ).

В промышленности широко применяется специальная пластмасса, обладающая хорошей адгезией и способностью к металлизации. Это тройной сополимер стирола, акрилонитрила и бутадиена – так называемый пластик АВС. Его отечественные аналоги стирол-бутадиен-акриловые пластики марок СНП-2 и СТАН. Для травления пластмасс типа АВС, нилона, мелатиновых смол и бакелита применяют раствор, содержащий (мас. доля, %): серная кислота 77-92, хромовый ангидрид 0-4,72, вода 6-21,5, ПАВ (фтористоводородное соединение) 0,1-0,2, плотность раствора 1,69-1,74 г/см^3 (чем она меньше, тем травление идет медленнее), t = 204÷70 °С, τ = 0,5÷30 мин. Хром в растворе должен быть в шестивалентном состоянии. Накапливание трехвалентного хрома не допускается.

После травления детали промывают в горячей воде. Для нейтрализации кислоты и удаления соединений хрома детали обрабатывают в течение 5 с в 10-15%-ном растворе едкого натра при температуре 70-100 °С. Для нейтрализации щелочи детали погружают на 10-30 с в 10%-ный раствор плавиковой кислоты. Затем промывают в течение 5-6 с в дистиллированной воде. В травильные растворы часто вводят фосфорную кислоту, например, в пропорции: серная кислота 150 мл, калиевый хромпик 10 г, фосфорная кислота 50 мл, вода 80 мл. Обработку в таком растворе ведут при температуре 70 °С в течение 10 мин. Пластмассы типа СНП-2 обрабатывают в растворе, содержащем: калиевый хромпик 75 г, серную кислоту 900 мл, воду 260 мл, сернокислую медь 3 г, сернокислое железо (закись) 3 г. Режим обработки: t = 50÷60 °С, τ = 10÷20 мин.

Для травления пластмасс на основе эфира целлюлозы применяют раствор состава: серная кислота 100 мл, калиевый хромпик 15 г, вода 30 мл. Эти эфиры можно обрабатывать в 5-10 %-ном растворе едкого натра в спирте при температуре 60 °С. Для повышения прочности сцепления и удаления тонкой пленки раствора пластмассу после травления в смеси серной кислоты и двухкалиевого хромпика обрабатывают струей пара, после чего прогревают в течение 10-20 мин при температуре, допускаемой для данной пластмассы.

Травление пластмасс типа АВС проводят в концентрированной серной кислоте, насыщенной хромовым ангидридом или двухкалиевым хромпиком и марганцовистокислым или бромноватистокислым калием. Процесс ведут в режиме: t = 50÷60 °С, τ = 10÷20 мин. Составы растворов для травления пластмасс типа АВС: хромовый ангидрид 50 г, серная кислота (плотность 1,84 г/см^3) 810 мл, вода 250 мл, марганцовистокислый калий 5 г, хромовый ангидрид 50 г, серная кислота (плотность 1,84 г/см^3) 810 мл, вода 250 мл, бромноватистокислый калий 5 г.

Для травления полистирола используют раствор, содержащий 150 г/л хромового ангидрида и 10 мл/л серной кислоты (t = 65 °С, τ = 20 мин). После травления детали промывают и переносят в раствор состава, г/л: едкий натр 50, мета-

силикат натрия 20, пирофосфат натрия 20, ПАВ 1, t = 90 °С, τ = 10 мин. Акрилонитростирол обрабатывают в растворе, содержащем хромовый ангидрид (150 г/л), бифторид натрия (75 г/л), при 80 °С в течение 15 мин. Затем промывают и переносят в щелочной раствор состава, г/л: едкий натр 50, метасиликат натрия 20, пирофосфат натрия 20, ПАВ 1. Режим обработки: t = 90 °С, τ = 10 мин.

Фторопласт обрабатывают 5-10 мин в растворе из 23 г натрия и 128 г нафталина, растворенных в 1 л тетрагидрофурана. Перед употреблением раствор в течение 2 ч перемешивают в сосуде при комнатной температуре. После травления изделия промывают в растворителе, сушат и направляют на сенсибилизацию. Другой раствор для травления фторопластовых изделий состоит из 1% раствора натрия в жидком аммиаке. Продолжительность обработки 10-30 с, после чего детали промывают в ацетоне и сушат. Фторопластовые изделия травят также в растворе: серная кислота 740-770 мл/л, бихромат натрия 30-40 г/л, вода 210-249 мл/л, t = 80÷90 °С; τ = 5÷30 с. В результате травления поверхность изделий из фторопласта приобретает темно-коричневую окраску.

Аминопласты травят в 10%-ном растворе соляной кислоты и затем последовательно обрабатывают 15 мин в 1%-ном растворе железоаммонийных квасцов при температуре 90 °С и 3 мин в 2%-ном растворе медного купороса при температуре 30 °С. Фенолформальдегидные пластмассы обрабатывают в азотной или фосфорной кислоте (85%-ный) при 60 °С.

Фенопласты подвергают травлению в растворе из 30 г бифторида натрия в 1 л азотной кислоты при комнатной температуре в течение 3 мин. После промывки их обрабатывают в растворе из 15 г/л едкого натра, 25 г/л метасиликата натрия, 1 г/л ПАВ при комнатной температуре и выдержке 5 мин.

Триацетат целлюлозы обрабатывают 10-20 мин в царской водке; резину – треххлористым фосфором, хлор – цетилхлоридом или раствором брома в четыреххлористом углероде, затем вулканизируют и графитируют.

Металлизация изделий из фенольной пластмассы, сополимеров, винилацетата, ацетатцеллюлозы, стекла и стеклотканей и т. п. затруднена из-за недостаточной их сцепляемости (адгезии) с металлом. Для создания нужных свойств на поверхность таких пластмасс наносят специальные адгезионные слои, представляющие собой лаковые пленки с наполнителем или без и обладающие высокой адгезией к металлу и к непроводнику.

В качестве адгезионных слоев без наполнителя используют термореактивные смолы, например, полиамидоэпоксидные, фенолформальдегидные, мочевиноформальдегидные, алкидные, полиамиды, полиэтаны и полиэфиры. Адгезионный слой наносят на изделие поливом или при помощи "купающегося" валика; толщина слоя 25-125 мкм. Слой предварительно отверждают, затем металлизируют и при соответствующих для данного материала температуре и давлении проводят окончательное отверждение.

Адгезионные слои с наполнителем представляют собой пленку с включенным в нее порошком (в качестве которого могут быть использованы окись железа, электрокорунд, наждак и т. п.), обеспечивающим требуемую степень шероховатости поверхности. Такие слои наносят на изделия в виде взвеси (суспензии) наполнителя в растворе пленкообразующего вещества. Размер частиц наполнителя – от долей микрона до нескольких микрон. Для увеличения шероховатости поверхности в качестве наполнителя используют порошки, растворимые в кислотах или воде, например, карбонат кальция, хлористый натрий и т. д. После сушки адгезионного

слоя наполнитель вытравливают в соответствующем растворителе, и в пленке остаются углубления. В качестве пленкообразующего вещества используют смолы, обладающие в растворах клеющими свойствами, например полихлорвинил, коллоксилин, клей БФ, полиамидную, эпоксидную, полиэфирную и др. Наносить суспензии можно окунанием, пульверизацией, поливом из фильеры и т. п.

Адгезионным средством для лавсана является, например, раствор термореактивной смолы и пластификатора в летучем растворителе (ацетоне, толуоле, ксилоле или их смеси). После нанесения адгезионный слой сушат в вакууме (при температуре, недостаточной для его отверждения) до полного удаления растворителя. Затем наносят Ni-P- или Co-P-покрытие, промывают изделие, сушат и нагревают до температуры полного отверждения адгезионного слоя.

При меднении изделий из пластмасс в качестве связующего вещества адгезионного слоя рекомендуется комбинация термореактивной и пластичной смол, а наполнителем – мелкодисперсные порошки, являющиеся катализаторами процесса химического меднения, например, тонкоизмельченные металлы или оксиды металлов: Ti, Al, Ca, Fe, Co, Zn; TiO_2, CuO_2 и их смеси. Можно использовать окись меди Cu_2O, которая после обработки в серной кислоте восстанавливается до Си. Концентрация порошка в адгезионном лаке до 80%.

Для изделий из гетинакса, полиамида, фарфора, кварца в качестве наполнителя используются высокодисперсные порошки окиси железа (или электрокорунд, наждак, тальк, двуокись титана) 100 г. В состав вводятся пленкообразователь (клей БФ) 100 г, спирт 100 г, дибутилфталат 2 г. Для лавсана, капрона, плексиглаза: наполнитель тот же 100 г, пленкообразователь (20%-ный раствор полиэфирной смолы в дихлорэтане) 400 г, метиленхлорид 50 г, дихлорэтан 50 г. Для полихлорвинила и триацетатного целлулоида: наполнитель тот же 100 г, пленкообразователь (смола СВХ-49) 80 г, дибутилфталат 15 г, ацетон 100 г, толуол 300 г, бутилацетат 100 г. Для целлулоида и дерева: наполнитель тот же 100 г, пленкообразователь (10%-ный раствор нитроколлодия) 160 г, дибутилфталат 16 г, растворитель № 647 300 г.

В табл. 1 приведены составы адгезионных лаков для нанесения на различные материалы.

Помол адгезионного состава производится в шаровой мельнице с применением стальных шаров. Время помола 60 ч. После помола смесь разбавляют соответствующим растворителем до вязкости 20-25 с по воронке ВЗ-3.

1. Составы адгезионных лаков с наполнителем для нанесения на поверхность пластмасс перед металлизацией

Материал изделия	Компоненты лака, %			
	Связующее	Пластификатор	Наполнитель	Растворитель
Полихлорвинил, триацетат, лавсан, гетинакс, стеклопластик	Смола СВХ-40 10	Дибутилфталат 2,5	30	№ 4 57,5
Целлулоид, дерево	Коллоксилин 3,5	То же 3,5	23	№ 647 70
Капрон, лавсан, полиамид	Полиэфирная смола 15	-	20	Хлорированные углеводороды 65
Фарфор, кварц	Эпоксидный клей или БФ 30	-	30	Спирты, кетоны 40

Адгезионные слои наносят на такие пластмассы, которые не могут металлизоваться непосредственно, например на лавсан. Адгезионный слой может ухудшать электрические свойства основного материала и более легко подвергаться старению, и поэтому непосредственная металлизация диэлектрика является предпочтительной.

После того как поверхность диэлектрика или адгезионного слоя заматирована, т. е. на ней создана требуемая шероховатость, его обезжиривают, проводят сенсибилизацию и активирование.

В общем виде процесс химической подготовки поверхности пластмасс к металлизации сводится к следующему.

Поступающие на металлизацию детали вначале обезжиривают в слабом щелочном растворе состава: натрий углекислый $Na_2CO_3 12H_2O$ 20 г/л, тринатрийфосфат $Na_2PO_4 \cdot 12H_2O$ 20 г/л, вспомогательные средства ОП-7 или ОП-10 3 г/л или жидкость "Прогресс" 20 мл/л. Температура раствора 50-60 °С, время обезжиривания 5-7 мин.

Затем детали промывают в горячей и холодной воде и подвергают травлению в растворе состава: калий двухромовокислый $K_2Cr_2O_7$ 75 г, кислота серная H_2SO_4 (плотность 1,84 г/см^3) 900 мл, вода 260 мл, медь сернокислая $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 3 г/л, железо сернокислое (закисное) $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 3 г/л, температура раствора 50-60 °С, время травления 10-20 мин.

Чтобы в травильный раствор не попадала вода, остающаяся на деталях после промывки, детали перед травлением погружают на несколько секунд в подогретый до 50-60 °С 75-80%-ный раствор серной кислоты.

После травления и промывки детали подвергают сенсибилизации в течение 3-5 мин в растворе состава: олово хлористое $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ 50 г/л, кислота соляная HCl (плотность 1,19 г/см^3) 60-80 мл/л.

Для создания на поверхности деталей нужных каталитических свойств их промывают и активируют в течение 2-3 мин в растворе состава: палладий хлористый $PdCl_2 \cdot 2H_2O$ 0,25-0,50 г/л, кислота соляная HCl (плотность 1,19 г/см^3) 10 мл/л.

В производстве многослойных печатных схем применяют комбинированный активатор следующего состава: палладий хлористый $PdCl_2 \cdot 2H_2O$ 0,25-5 г/л, олово хлористое $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ 12-22 г/л, кислота соляная HCl (плотность 1,19 г/см^3) 40-60 мл/л.

Процессы сенсибилизации и активирования проводятся при комнатной температуре.

При обработке деталей в растворе хлористого олова на их поверхности адсорбируется олово. Оно создает центры для закрепления палладия в процессе последующего активирования в растворе хлористого палладия.

Используются растворы, содержащие в широком интервале концентраций хлористое олово (10-100 г/л) и соляную кислоту, плотность 1,19 г/см^3 (10-80 мл/л).

Обычно применяют раствор следующего состава: олово хлористое $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ 25 г/л, кислота соляная HCl (плотность 1,19 г/см^3) 40 мл/л.

Процесс сенсибилизации осуществляется при комнатной температуре, время обработки 1-3 мин. Более гладкие поверхности обрабатывают более продолжительное время – до 30 мин. Затем производится тщательная промывка водой.

В процессе хранения раствора происходит гидролиз хлористого олова, вследствие чего выпадают в осадок гидраты окиси олова. По этой причине рас-

твор приготовляют в небольших количествах и часто заменяют свежим. Хранить раствор рекомендуется в темной склянке.

После активирования детали промывают в воде и обрабатывают в растворе, содержащем 30 г/л гипофосфата, при температуре 70-80 °С в течение 10-20 мин для восстановления палладия. После такой обработки детали подвергают химическому никелированию обычно в щелочных растворах. Толщина покрытия для последующей гальванической металлизации составляет 1-2 мкм.

Физические методы подготовки поверхности пластмасс к металлизации используют для придания поверхности отрицательного заряда, что способствует улучшению адгезии. Среди таких методов радиоактивное облучение, воздействие статического электричества, обработка катодным распылением в вакууме, зарядом высокого напряжения. Например, фторопласт подвергают радиации от кобальтового источника или электронного генератора в присутствии другого мономера, который при этом полимеризуется на фторопласте-4. Возможна также его обработка коронным разрядом в атмосфере азота.

Чтобы обеспечить высокое качество поверхности пластмассовых деталей, подвергаемых металлизации, к процессу их прессования предъявляются общие требования: хорошее состояние при прессовании; снятие остаточных напряжений и обеспечение стабильности свойств прессованных деталей.

Химическое меднение пластмасс

При металлизации пластмасс вначале наносят химическим путем токопроводящий слой (медь или никель), а затем электрохимическим способом наносят в случае декоративной отделки – медь, никель, хром, а для других целей – серебро.

Химическая медь эластичнее других химических покрытий металлами, например, химического никеля. Процесс нанесения покрытия осуществляется при комнатной температуре. Поэтому химическое меднение широко применяется как самостоятельная операция упрочнения пластмасс и в качестве составляющей в комплексном процессе металлизации пластмасс и других диэлектриков.

Перед химическим меднением поверхность диэлектрика должна быть подготовлена теми же способами, что и перед химическим никелированием:

Прежде всего на поверхности диэлектрика создают шероховатость механическим и химическим способами. Затем ее обезжиривают, подвергают сенсибилизации и активированию.

Детали обезжиривают в течение 3-5 мин при 40-50 °С в растворе (в г/л): тринатрийфосфат 30-40, натр едкий 8-10, стекло натриевое жидкое 5-7, карбонат натрия 40-45.

Травление деталей ведут в растворе, содержащем 100 г серной кислоты H_2SO_4 (плотность 1,83 г/см^3) и 30 г хромового ангидрида в течение 1-5 мин при 60 °С. Травление создает шероховатость поверхности до Rz = 1 мкм.

Сенсибилизируют детали в растворе двухлористого олова (30-40 г/л) и соляной кислоты HCl (концентрированной) (30-40 г/л) при комнатной температуре. Затем их тщательно промывают в проточной и дистиллированной воде. Активируют детали в растворе двухлористого палладия. В результате этого на поверхности осаждается тонкий слой палладия

$$Sn^{2+} + Pd^{2+} \rightarrow Pd + Sn^{4+}.$$

Растворы для химического меднения содержат в своем составе: комплексную соль меди, вещества, регулирующие pH, восстановитель и стабилизирующие добавки.

В качестве соли меди применяют сернокислую медь, реже – углекислую. В качестве комплексообразователей меди применяют глицерин, оксалаты, карбонаты, аммиак, трилон Б, соли винной кислоты. В качестве восстановителя используют исключительно формальдегид, хотя для этой цели могут быть использованы: гипофосфит, гидразинсульфат и др.

Химическое меднение протекает при комнатной температуре в щелочной среде при pH > 11.

Различают разбавленные и концентрированные растворы для химического меднения. Разбавленные растворы имеют невысокие концентрации основных компонентов, обеспечивают небольшие скорости осаждения (до 1 мкм/ч) меди, но обладают большой стабильностью. Концентрированные растворы имеют высокие концентрации основных компонентов и более высокие скорости осаждения (до 5 мкм/ч), но нестабильны. При этом катализируется процесс восстановления меди.

За 10-15 мин осаждается ~10 мкм меди. Детали перед меднением следует погружать в 2%-ный раствор хлорида палладия (2-3 мл/л) и соляной кислоты HCl (1-1,5 мл/л).

Составы растворов для химического меднения пластмасс приведены в табл. 2.

Палладий является поглотителем водорода, поэтому ослабляется адгезия. Активирование поверхности следует вести в растворе $PdCl_2$ (3-4 г), NH_4OH (250-300 мл), трилона Б (10-15 г) и дистиллированной воды (1 л). При этом черная пленка палладия отсутствует, прочность сцепления возрастает от 1-2 до 4-5 МПа и улучшается структура меди, нанесенной химическим способом.

Процесс химического меднения полиэтилена включает следующие технологические операции: очистку и обезжиривание в водном растворе препарата "Новость" при концентрации 4 г/л и t = 20÷25°C; травление в растворе серной кислоты (1,71 -17,7 моль/л) и бихромата калия (0,1 моль/л) при t = 70 °C и выдержке τ = 10÷15 мин; сенсибилизацию в растворе хлористого олова (0,02-0,1 моль/л) и соляной кислоты (0,7-1,4 моль/л) при t = 18÷20 °C и τ = 2 мин; активирование в растворе хлористого палладия (0,2-0,3 г/л) и соляной кислоты (0,10-0,12 моль/л), τ = 2 мин при 18-20 °C; химическое меднение в растворе состава, моль/л: сернокислая медь 0,02-0,03, хлористый никель 0,005-0,010, тартрат калия натрия 0,10, формальдегид 0,1-0,4, едкий натр до pH = 12,4-12,6, t = 20 °C, τ = 5-10 мин, плотность загрузки 0,25-0,30 $см^2$/л.

По подслою химической меди производят осаждение гальванической меди толщиной 20 мкм в обычном кислом электролите меднения следующего состава, г/л: медь сернокислая $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 200-250, кислота серная H_2SO_4 50.

Катодная плотность тока $i_к$ = 0,5÷2 $А/дм^2$, температура комнатная, механическое перемешивание.

Лучшие результаты получаются при осаждении меди вначале из кислого электролита толщиной 3-5 мкм, а затем из электролита блестящего меднения (табл. 3) – до заданной толщины.

Меднение печатных плат из гетинакса или стеклопластика с отверстиями ведут в щелочном электролите с концентрацией меди 25-30 г/л при $i_к$ = 3÷4 $А/дм^2$ на толщину 15-18 мкм. Электролит следует перемешивать, так как в про-

2. Составы растворов для химического меднения пластмасс

Вещество	Количество в составе, г/л	
	1	2
Сернокислая медь	50-60	10-15
Хлористый никель	10-15	-
Сегнетова соль	120-150	25-30
Формалин, мл/л	8-10	10-15
Сода каустическая (гидроксид натрия NaOH)	35-40	10-15

3. Составы электролитов блестящего меднения пластмасс

Компоненты и режим процесса	Составы	
	1	2
Медь сернокислая $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, г/л	200-250	200-220
Кислота серная H_2SO_4, г/л	40-60	35-45
Тиомочевина $NH_2CS \cdot NH_2$,г/л	0,03-0,05	0,02-0,04
Анилин солянокислый C_6H_8NCl, г/л	0,03-0,05	Паранитроанилин 0,03-0,04
Плотность тока, А/дм^3	5-7	5-7
Температура электролита, °С	15-20	15-20
Способ перемещения	Качание анодных штанг 60-80 мин$^{-1}$	

тивном случае в отверстиях диаметром 1-2 мм не обеспечивается получение нужного слоя.

Металлизация деталей из стеклопластика проводится для экранирования приборов и других целей.

Детали, поступающие на металлизацию, подвергаются обдувке абразивными материалами с целью придания им шероховатости.

После обработки абразивом детали обдувают чистым воздухом и хранят в полиэтиленовых мешках до металлизации. Если на деталях имеются места, не подлежащие нанесению покрытия, то их защищают перед металлизацией перхлорвиниловой эмалью (ХВЭ-16 или ХВЭ-22).

Обезжиривание, сенсибилизацию, активное и химическое меднение производят в тех же растворах, которые применяются для обработки пластмасс СНП-2 и СТАН.

По слою химической меди наращивают в обычном электролите кислого меднения 12-15 мкм меди. Затем в электролитах серебрения наращивают 12-15 мкм серебра. Общая толщина покрытия составляет 25-30 мкм.

С целью увеличения срока службы поверхности деталей подвергают гальваническому палладированию в электролитах известного состава (1-2 мкм). Для удаления остатков электролитов, могущих адсорбироваться порами покрытий, производят промывку деталей в дистиллированной воде в течение 30 мин при температуре 70-80 °С и сушку при температуре 100-110°С в течение 20-30 мин в обычном сушильном шкафу, а затем в вакуумном шкафу при температуре 70-80 °С в течение 2 ч.

Готовые детали хранят в полиэтиленовых мешках.

Химическое меднение пленок полиэтилена (ПЭ), полиэтилентерефталата (ПЭТФ), полиамида (ПМ) производят в ванне, составленной из следующих двух растворов, г:

1) сернокислая медь 31,8; хлористый никель 8,2; формалин 78,6; вода 530 мл;

2) гидроокись натрия 23,9; сегнетова соль 95,5; безводная сода 8,5; вода 532 мл.

После смешения раствор фильтруют и добавляют в него в качестве стабилизатора 0,01 г/л диэтилдитикарбамата. Температура процесса комнатная; продолжительность меднения 5-10 мин. Адгезионная прочность покрытия составляет для ПЭТФ и ПЭ 1,0 МПа, для ПМ 1,5 МПа, что удовлетворяет техническим условиям. Ni-P-слой толщиной 1 мкм снижает газопроницаемость пленок ПМ, ПЭ и ПЭТФ по воздуху и гелию на один порядок. Многослойные никелевые и медные покрытия на пленках ПЭ и ПЭТФ при суммарной толщине металлического покрытия от 0,8 до 2 мкм снижают газопроницаемость по воздуху и гелию на два порядка.

Химическое никелирование пластмасс

Нанесение металлических покрытий на неметаллические материалы – пластмассы, стекло, фарфор, керамику, кварц и др. – проводится с целью получения токопроводящего слоя на их поверхности для последующей гальванической металлизации.

Технология металлизации термопластичных (винипласт) и термореактивных (текстолит и гетинакс) пластмасс включает матирование, сенсибилизацию, активирование и собственно никелирование (химическое и электрохимическое). Матирование осуществляют в растворе, содержащем 15 г двухромовокислого калия, 100 мл серной кислоты (плотность 1,84 г/см^3) и 100 мл воды; сенсибилизацию – в растворе двухлористого олова (20 г/л) и соляной кислоты (70 мл/л) в течение 5 мин при комнатной температуре; активацию – в растворе хлористого палладия (1 г/л) при pH = 2 в течение 10 мин при комнатной температуре.

Химическое никелирование проводят в растворе состава, г/л: сернокислый никель 25, гипофосфит натрия 19, гидроокись аммония 0,64, уксусная кислота 1,2, уксуснокислый натрий 6,0, сернокислый аммоний 1,4, борная кислота 1,2; pH = 5,5-5,8 (поддерживается в 10%-ном растворе серной кислоты). Доращивают никелевый слой до нужной толщины электрохимическим путем. Перед загрузкой в ванну изделия в течение 2-3 с декапируют при комнатной температуре в растворе 18-20 г/л соляной кислоты и завешивают в ванну с сульфаминовым электролитом и органическими добавками.

Изделия из полистирола обезжиривают, выравнивают напряжения, травят, сенсибилизируют, активируют, обрабатывают в растворе гипофосфита кальция, химически никелируют. Обезжиривание проводят в растворе состава, г/л: фосфат натрия 20, карбонат натрия 20, химикат "Прогресс" (20%-ный) 16-20 мл/л или детергент ОП-7 (ОП-10, алкамон ОС) 20, t = 5÷10 мин при температуре 50-60 °С и перемешивании (барботированием или мешалкой). Промывка в теплой и холодной воде. Выравнивание внутренних напряжений и упорядочение структуры, что способствует травлению, производят обработкой в смеси спирт-ацетон в соотношении 3:1, после чего изделия промывают водой.

Травление осуществляют в растворе состава, г: бихромат калия 75, сульфат меди 3, сульфат железа 3, вода 420 мл, серная кислота (плотность 1,84 г/см^3) 900 в режиме t = 30÷50 °С, τ = 15 мин. При 50 °С в 1 л травильной смеси можно об-

работать до 2 $м^2$ поверхности. Качество травления проверяют по гидрофильности поверхности изделия (пленка воды после смачивания должна удерживаться в течение 15-20 с). Шероховатость определяют под микроскопом при увеличении в 500-1000 раз. После травления изделия тщательно промывают.

Сенсибилизацию проводят в растворе: 50 г/л хлорида олова, 45 мл/л концентрированной соляной кислоты и 2 г/л металлического олова при $\tau = 1 \div 2$ мин, комнатной температуре и тщательной промывке изделий.

Активирование ведут в растворе: 0,5 г/л хлористого палладия и 10 мл/л концентрированной соляной кислоты при комнатной температуре в течение $\tau = 1 \div 2$ мин.

Обработка в растворе гипофосфита натрия позволяет восстанавливать палладий на поверхности изделия до металлического и поглощать его избыток в растворе. Для этого изделия на 30 с завешивают в ванну с 5%-ным раствором гипофосфита натрия при комнатной температуре.

Химическое никелирование осуществляют в растворе состава, г/л: хлористый никель 5, гипофосфит натрия 15, янтарная кислота 12, едкий натр 4, фторид натрия 1; pH = 5÷6, плотность загрузки 2 $дм^2/л$, температура 20-60 °С. Толщина слоя за 15 мин никелирования достигает 0,2-0,5 мкм, что достаточно для последующего доращивания его гальваническим путем. В 1 л раствора можно (без корректирования) покрыть до 40 $дм^2$ пластмассы. В случае повторного использования раствор фильтруют и добавляют соль никеля. После химического никелирования детали промывают водопроводной, а затем дистиллированной водой, после чего их высушивают или хранят в емкости с дистиллированной водой.

Технология металлизации оргстекла предусматривает матирование или гидрофилизацию, сенсибилизацию, активирование и химическое никелирование. Матирование проводят механической или химической обработкой (травлением); гидрофилизацию – 5-30-минутной обработкой при комнатной температуре в водных солянокислых растворах олова, содержащих 0,1 моль/л двухлористого олова и 0,12 моль/л соляной кислоты. В этом же растворе одновременно происходит и сенсибилизация изделий, которые промывают в проточной дистиллированной воде.

Химическое никелирование осуществляют в растворе состава, моль/л: хлористый никель 0,1, гипофосфит кальция 0,1, уксуснокислый натрий 0,06; pH = 5 (регулируют раствором соляной кислоты), температура 50-60 °С, скорость осаждения 0,3 мкм/ч. По техническим условиям достаточен слой толщиной 0,1 мкм.

Химическую металлизацию полимерных пленок производят с целью создания на них токопроводящих слоев или повышения непроницаемости по отношению к газам и жидкостям. Предварительная обработка пленок включает химическое травление или облучение в тлеющем разряде, что обеспечивает хорошую смачиваемость поверхности и прочность сцепления с ней покрытия.

Пленки полиэтилена (ПЭ), полиэтилентерефталата (ПЭТФ) и полиамида (ПМ) обезжиривают в растворе из 740 мл серной кислоты, 40 г бихромата натрия и 250 мл воды при 70-75 °С. Продолжительность операции для ПЭ (толщина покрытия 120 мкм) 2-5 мин, для ПЭТФ (толщина 20 мкм) около 1 мин, для ПМ (толщина 10 мкм) 5 с. Пленки ПЭ и ПЭТФ протравливают в 20%-ном растворе едкого натра при 50-60 °С. Продолжительность обработки пленок ПЭ 2-5 мин, пленок ПЭТФ – около 1 мин. Полиамидную пленку в щелочи не обрабатывают. Сенсибилизацию ведут в растворе с 10 г/л хлористого олова и 40 мл/л соляной кислоты в течение 5 мин при комнатной температуре. Затем промывают в проточной водопроводной и дистиллированной воде. Активирование проводят

в растворе хлористого палладия (0,5 г/л) при pH = 2,5÷3,5 в течение 5 мин при комнатной температуре, с последующей промывкой в проточной и дистиллированной воде. Химическое никелирование осуществляют в растворе состава, г/л: хлористый никель 30, гипофосфит натрия 10, уксуснокислый натрий 10, лимоннокислый натрий 45, сульфид свинца 0,005-0,01; pH = 5, температура 82 ± 2 °С. Продолжительность никелирования для получения покрытия толщиной 1 мкм составляет: для ПЭ 5-10 мин, для ПЭТФ и ПМ 2 мин.

Подготовка пленок фторопласта к металлизации включает обработку в тлеющем разряде при напряжении 1500 В в течение 10-15 мин. Сенсибилизацию осуществляют в том же растворе, что и для предыдущих пленок, при комнатной температуре, с выдержкой 15-20 мин; активирование – в том же растворе, τ = 15 мин при 80 °С. Химическое никелирование выполняют в щелочном растворе состава, г/л: хлористый никель 30, хлористый аммоний 50, гипофосфит натрия 10, лимоннокислый натрий 60, сульфид свинца 0,01, pH = 8÷9, температура 80 ± 2 °С.

При нанесении на пленки ПЭ и ПЭТФ многослойных покрытий их первичный слой дополнительно активируют в течение 10-15 с.

Стеклопластик никелируют по следующей технологии. Пескоструйная обдувка абразивом (электрокорундом зернистостью 8-12) при давлении воздуха 0,1-0,15 МПа. Затем обдувка чистым воздухом для удаления пыли с изделий. Обезжиривание в растворе состава, г/л: кальцинированная сода 20, тринатрийфосфат 20, детергент ОП-7 или ОП-10 3, температура 50-60 °С. Продолжительность операции 10-15 мин. Травление в растворах состава, мл/л: 1) серная кислота 120, фтористоводородная кислота (40%-ная) 120, хромовый ангидрид 60 г/л; 2) фтористоводородная кислота (40%-ная) 40, фтористый аммоний 18 г/л.

Сенсибилизацию выполняют в растворе, содержащем 25 г/л хлористого олова и 40 мл/л соляной кислоты; температура комнатная, выдержка 1-3 мин. Для очень гладких поверхностей – до 30 мин. Ввиду малой стойкости раствор для сенсибилизации целесообразно приготавливать в небольших количествах и хранить в темных сосудах. Активирование поверхности проводят в растворе хлористого палладия (0,5-1 г/л) и соляной кислоты (8-10 мл/л); температура комнатная, выдержка 1-3 мин. Затем изделия тщательно промывают. Восстанавливают палладий в растворе гипофосфита (30 г/л) при температуре 70-80 °С в течение 10-20 мин. Химическое никелирование проводят в растворе состава, г/л: сернокислый никель 25, гипофосфит натрия 25, хлористый аммоний 35, лимоннокислый натрий 50, аммиак (25%-ный) до pH = 8÷9. Температура раствора 80-88 °С. Можно использовать работающий при комнатной температуре раствор, г/л: гипофосфит никеля 26,7, борная кислота 1,2, сернокислый аммоний 2,6, уксуснокислый натрий 4,9, pH = 5,5÷6,0, скорость никелирования 1 мкм/ч.

Процесс осаждения магнитных сплавов Ni-Fe-P на лавсан включает операции матирования, обезжиривания, травления, сенсибилизации, активирования и никелирования. После каждой операции изделие промывают. Матирование производят травлением или нанесением адгезионного слоя на основе смол ВХВД-40,37 с наполнителем – немагнитным порошком γ-Fe_2O_3. Величина частиц – менее микрона. Могут быть использованы смолы без наполнителей. Обезжиривание ведут в растворе тринатрийфосфата (20 г/л) в течение 10 мин с последующей промывкой в дистиллированной воде. Затем обрабатывают в 25%-ном растворе едкого натра с натрийлаурилсульфатом при температуре 90 °С в течение 6-10 мин с последующей промывкой в горячей и холодной воде.

Травление проводят в 25%-ном растворе соляной кислоты 1 мин при комнатной температуре с последующей промывкой в холодной воде и сушкой. Сенсибилизация выполняется в растворе двухлористого олова (10 г/л) при комнатной температуре 2-3 мин с последующей промывкой в дистиллированной воде при комнатной температуре. Активирование проводят в растворе хлористого палладия (0,5 г/л) при комнатной температуре в течение 1 мин с последующей промывкой в дистиллированной воде. Никелирование осуществляют в растворе состава, г/л: хлористый никель 13,3, железистосернокислый аммоний 9,6, сегнетова соль 80,5, гипофосфит натрия 10, едкий натр до pH = 9, температура 80 °С.

Более высокие магнитные свойства получают на лавсановой пленке, никелированной в растворе с pH = 9 при температуре 80 °С, толщине слоя 0,3 мкм и скорости осаждения 0,2 мкм/мин.

Технологический процесс химического никелирования стеклопластика перед гальванической металлизацией предусматривает, что перед нанесением слоя химического покрытия пластмассу подвергают обработке абразивом, обдувке воздухом, обезжириванию, травлению, сенсибилизации, активации, восстановлению палладия в растворе гипофосфита (как описано выше), а затем наносят химический никель в растворе следующего состава (в г/л): никель сернокислый $NiSO_4.7H_2O$ 25, аммоний хлористый NH_4Cl 35, натрий лимоннокислый $Na_3C_6H_5O_7 \times nH_2O$ 50, гипофосфит натрия $NaH_2PO_2 \cdot H_2O$ 30, аммиак NH_4OH 25%-ный до pH = 8-9. Температура раствора 80-88 °С.

Представляет интерес раствор для химического никелирования, работающий при комнатной температуре и содержащий (г/л): гипофосфит никеля $Ni(H_2PO_2)_2$ 26,7, кислота борная H_3BO_3 1,2, алюминий сернокислый $Al_2(SO_4)_3 \cdot 12H_2O$ 2,6, натрий уксуснокислый $CH_3COONa \times 3H_2O$ 4,9. Скорость осаждения 1 мкм/ч, pH = 5,5÷6,0.

Затем по подслою химического никеля наносят гальваническим способом медь толщиной 12-15 мкм при плотности тока 1-2 А/дм^2 из обычного кислого электролита следующего состава (в г/л): медь сернокислая $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 200-250, кислота серная H_2SO_4 50.

С целью создания блестящей поверхности проводят осаждение гальваническим способом блестящего никеля в электролите следующего состава (в г/л): никель сернокислый $NiSO_4.7H_2O$ 280-300, никель хлористый $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ 45, кислота борная H_3BO_3 30, сахарин $C_7H_5NO_3S$ 1,1,4-бутиндиол $CH_2OH\text{-}C \equiv C\text{-}CH_2OH$ 0,5, фталимид $C_8H_5O_2N$ 0,1. Температура раствора 50-60 °С, pH = 3,5-4, плотность тока 3-15 А/дм^2.

На блестящий никель толщиной 7 мкм наносят хром толщиной 0,5-1 мкм из обычного электролита хромирования.

В промышленности широко используются алюминиевые трубчатые детали, у которых соединение фланцев с трубой осуществляется методом склеивания эпоксидными клеями с наполнителями.

Для металлизации клеевого шва применяется та же технология, что и для металлизации диэлектриков. Перед металлизацией клеевой шов зашкуривают с целью придания его поверхности шероховатости, обезжиривают протиранием тампоном, смоченным органическим растворителем, и активируют раствором хлористого палладия следующего состава: палладий хлористый $PdCl_2 \cdot 2H_2O$ 1 г/л; кислота соляная HCl (плотность 1,19 г/см^3) 10 мл/л.

Нанесение активирующего состава осуществляется кистью в три-четыре приема с промежуточной сушкой каждого слоя на воздухе.

Перед химическим никелированием погружают склеенные детали в раствор, содержащий 30 г/л гипофосфита натрия при температуре 70-80 °С, и выдерживают в течение 20 мин для восстановления нанесенного слоя палладия.

После восстановления палладия и промывки детали погружают в обычный кислый раствор химического никелирования и наносят покрытие толщиной не менее 15 мкм.

Перед химическим никелированием клеевого шва алюминиевые детали подвергают анодированию в серной кислоте, после чего наружная поверхность алюминиевых деталей подвергается защите соответствующими лаками.

Процесс осаждения химического никеля из растворов с целью защиты и упрочнения поверхностей неметаллических материалов достаточно распространен, в том числе в производстве таких крайне противоположных материалов, как стекло и алмаз.

Ниже приводится описание соответствующих технологических процессов.

Процесс химического никелирования стекла, например, марки С-49-2, состоит из операций матирования, сенсибилизации, активирования, химического и электролитического никелирования. Матирование проводят протиркой стекла в течение 1 ч пастой из 50 г сернокислого бария, 10 г фтористого аммония и 28 мл плавиковой кислоты (плотность 1,49 г/см^3) или травлением в растворе из 35 мл/л плавиковой кислоты (40%-ный) и 20 г/л фтористого аммония при комнатной температуре в течение 5 мин. Сенсибилизация выполняется в растворе двухлористого олова (20 г/л) и соляной кислоты (70 мл/л) в течение 5 мин при комнатной температуре. Активирование осуществляют в растворе хлористого палладия (1 г/л) в течение 10 мин при комнатной температуре.

Химическое никелирование проводят в растворе состава, г/л: сернокислый никель 25, гипофосфит натрия 1-9, гидроокись аммония 0,64, уксусная кислота 1,2, уксуснокислый натрий 6, сернокислый аммоний 1,4, борная кислота 1,2, pH = 5,5÷5,8 (поддерживают 10%-ной серной кислотой) при комнатной температуре. При плотности загрузки 1 дм^2/л скорость осаждения покрытия 0,13 мкм/ч. Осадки никеля содержат 9-10%. Раствор можно использовать 4-5 раз. Перед погружением в электролитическую ванну для доращивания покрытия изделия 2-3 с декапируют при комнатной температуре в растворе 18- 20 г/л соляной кислоты. Покрытия осаждают из сульфамидного электролита с органическими добавками при 45-50 °С, катодной плотности тока 0,5 А/дм^2 (в первые 10-15 мин процесса), а затем при 2 А/дм^2. Из этого электролита при указанных режимах получают покрытия с низкими внутренними напряжениями.

Химическое никелирование поверхности искусственных алмазов, создающее вокруг их зерен металлическую оболочку, предназначено для повышения прочности сцепления между алмазными зернами и связкой, отвода образующегося в процессе резания тепла от их режущих кромок и предохранения осколков разрушившихся алмазных зерен от выпадения из сравнительно мягкой органической связки. Все это способствует повышению режимов резания и более длительному удержанию зерен искусственных алмазов в шлифовальном круге.

Технология химического никелирования искусственных алмазов включает в себя операции обезжиривания в 15-17%-ном растворе едкого или углекислого натра при температуре 40-50 °С до полного смачивания поверхности алмазных

зерен, промывки в горячей проточной воде, сенсибилизации в течение 1-2 мин в растворе из 10 г/л хлористого олова и 40 мл/л соляной кислоты при комнатной температуре, последующей промывки и активирования в растворе 1 г/л хлористого палладия и 10 мл/л соляной кислоты при комнатной температуре в течение 1-3 мин. Двукратное химическое никелирование (предварительное и окончательное) производят в одном из описанных выше щелочных растворов. Можно также производить химическое никелирование алмазов в растворах с концентрацией ионов гипофосфита в пределах 0,001-0,035 моль при молярном соотношении между ионами никеля и гипофосфита в пределах 0,04-0,25; 0,04-7,0 и 1,6-6,0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алимов Ю.А.** Электроискровое легирование сталей твердосплавными электродами // Технология и организация производства. – 1978. – № 3. – С. 45.
2. **Анельчик Д.Е., Полевой С.Н., Евдокимов В.Д.** Ремонт, восстановление и испытание инструмента и технологической оснастки: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Техника, 1981. – 200 с.
3. **Антонов В.А., Кондратьев И.А.** Эффективность применения порошковых проволок ПП-АН140 и ПП-АН148 для наплавки вырубных штампов холодной штамповки // Автоматическая сварка. – № 1. – 1984.
4. **Аршинов В.А., Алексеев Г.А.** Резание металлов и режущий инструмент. – М.: Машиностроение, 1977. – 440 с.
5. **Аскинази Б.М.** Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. – 184 с.
6. **Аскинази Б.М.** Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1989. – 200 с.
7. **Бабичев А.П., Устинов В.Т.** Оптимальные режимы вибрационной отделочно-упрочняющей обработки в бункерах // Вестник машиностроения. – 1975. – № 8. – С. 64.
8. **Баженов М.Д., Байчман С.Г., Карпачев Д.Г.** Твердые сплавы: Справочник. – М.: Металлургия, 1978. – 184 с.
9. **Байрачный Б.И.** и др. Справочник гальваника. – Харьков: Прапор, 1988. – 182 с.
10. **Барсов А.И.** Технология инструментального производства. – 4-е изд. – М.: Машиностроение, 1975. – 272 с.
11. **Белоцкий А.В.** Упрочнение литых и деформированных инструментальных сталей. – Киев: Техника, 1989. – 168 с.
12. **Бельский Е.И.** Упрочнение литых и деформированных инструментальных сталей. – Минск: Наука и техника, 1982. – 280 с.
13. **Бобровский В.А.** Электродиффузионный износ инструмента. – М.: Машиностроение, 1970. – 246 с.
14. **Болтарович А.В.** Технология нанесения химического никель-кобальт-фосфорного покрытия // Технология и организация производства. – 1983. – № 4. – С. 36.
15. **Болтарович А.В., Луценко С.В.** Бесшламное антикоррозионное фосфатирование стальных деталей // Технология и организация производства. – 1981. – № 2. – С. 47.
16. **Болтарович А.В., Луценко С.В.** Совмещенный метод фосфатирования стальных деталей // Технология и организация производства. – 1981. – № 1. – С. 47.
17. **Болтарович А.В., Черняк Н.В.** Прогрессивная технология фосфатирования стальных деталей // Технология и организация производства. – 1982. – № 2. – С. 45.
18. **Борисенко А.П., Дубко В.Д., Прокопец А.Л.** Химико-термическая обработка режущего инструмента из быстрорежущей стали // Технология и организация производства. – 1997. – № 3. – С. 38.
19. **Бродянский А.П., Анельчишина Е.А., Бунда И.А.** Упрочнение инструмента на установке "Булат" // Технология и организация производства. – 1977. – № 2. – С. 54-55.
20. **Быргазов В.А.** Электрополирование деталей из нержавеющих сталей // Технология и организация производства. – 1978. – № 3. – С. 55.
21. **Великих В.С., Гончаренко В.П., Картавцев В.С.** Лазерное упрочнение инструментальных сталей // Технология и организация производства. – 1976. – № 11. – С. 45.

22. **Вилль В.И.** Сварка металлов трением. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1970. – 175 с.

23. **Вишенков С.А.** Химические и электрохимические способы осаждения металлопокрытий. – М.: Машиностроение, 1975. – 312 с.

24. **Владимиров В.М.** Изготовление штампов, пресс-форм и приспособлений. – 3-е изд. – М.: Высш. шк., 1981. – 431 с.

25. **Воловик Е.Л.** Справочник по восстановлению деталей. – М.: Колос, – 1981. – 351 с.

26. **Воробьев Г.Г., Курьеров В.Н., Шевченко В.И.** Применение режущего инструмента, упрочненного на установке "Булат" // Технология и организация производства. – 1982. – № 3. – С. 35.

27. **Востриков Г.Г., Проскурин Г.А.** Пути повышения стойкости и долговечности инструмента и технологической оснастки // Тракторы и сельхозмашины. – 1977. – № 5. – С. 39-41.

28. **Геллер Ю.А.** Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1983. – 526 с.

29. **Геллер Ю.А.** Современные инструментальные стали для режущих инструментов и их термическая обработка. – М.: Машиностроение, 1972. – 47 с.

30. **Гладилин А.Н., Малевский Н.П.** Справочник молодого инструментальщика по режущему инструменту. – 3-е изд. – М.: Высш. шк., 1973. – 320 с.

31. **Гольдберг Б.** Удар холодом // Изобретатель и рационализатор. – 1977. – № 3. – С. 32-33.

32. **Гольдштейн М.И., Фарбер В.М.** Дисперсионное упрочнение стали. – М.: Металлургия, 1979. – 208 с.

33. **Горбунов Ю.А., Климухин Ю.И., Верхотуров А.Д.** Механизированная установка для электроискрового легирования режущего инструмента // Технология и организация производства. – 1980. – № 1. – С. 40.

34. **Горохов В.А.** Отделка жаропрочных сплавов поверхностным пластическим деформированием // Технология и организация производства. – 1977. – № 3. – С. 24.

35. **Горшин С.Н.** Консервирование древесины. – М.: Лесная промышленность, 1977. – 336 с.

36. **Грибенкин А.Г., Вахитова Н.М.** Повышение стойкости режущего инструмента // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1977. – № 8. – С. 29-30.

37. **Гринченко И.Г.** Упрочнение деталей из жаропрочных и титановых сплавов. – М.: Машиностроение, 1971. – 120 с.

38. **Гулоян Ю.А., Голозубов О.А.** Справочник молодого рабочего по производству и обработке стекла и стеклоизделий. – М.: Высш. шк., 1989. – 224 с.

39. **Гуляев А.П., Малинина К.А., Саверина С.М.** Инструментальные стали: Справочник. – М.: Машиностроение, 1975. – 272 с.

40. **Гурей И.В.** Технологическое обеспечение качества и эксплуатационных свойств изделий параметрами импульсного фрикционного упрочнения: Дис. … докт. техн. наук: 05.02.08. – Одесса, 2002. – 272 с.

41. **Дибнер Л.Г.** Развитие твердых смазок для покрытия инструмента // Режущие инструменты. – Экспресс-инфор., ВИНИТИ, 1980. – № 4.

42. **Евдокимова А.Н.** Триботехнические особенности и практические возможности высокоскоростного знакопеременного трения и шлифования: Дис. … докт. техн. наук: 05.05.04. – К., 1999. – 450 с.

43. **Жигалко Н.И.** Проектирование и производство режущих инструментов. – 2-е изд. – Минск: Вышэйш. шк., 1975. – 399 с.

44. **Затуловский Д.М., Сафронов В.В.** Электромеханическая обработка инструментальных сталей // Исследование процессов производства и проектирование изделий машиностроения. – Орел: Приокское кн. изд-во, 1978. – 233 с.

45. **Изготовление** прессово-штампового инструмента, упрочненного наплавкой / Ю.А. Скопенко // Технология и организация производства. – 1981. – № 3. – С.33.

46. **Инструментальные** стали / Л.А. Позняк, С.И. Тишаев, Ю.М. Скрыпченко и др. – М.: Металлургия, 1980. – 244 с.

47. **Исследование** износостойкости быстрорежущей стали после карбонитрации / Б.Г. Колмаков, Д.А. Прокошкин, В.Г. Грицай и др. // Химико-термическая обработка металлов и сплавов. – Минск: Вышэйш. шк., 1977. – С. 196-197.

48. **Кадкевич О.В.** Низкотемпературное фосфатирование деталей из углеродистых сталей // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1977. – № 12. – С. 33.

49. **Какуевицкий В.А.** Применение газотермических покрытий при изготовлении и ремонте машин. – Киев: Техника, 1989. – 176 с.

50. **Каледин Б.А., Чепа П.А.** Повышение долговечности деталей поверхностным деформированием. – Минск: Наука и техника, 1974. – 231 с.

51. **Каменичный И.С.** Пособие термисту инструментального цеха. – Киев: Техника, 1982. – 135 с.

52. **Карпинос Д.М.** и др. Композиционные материалы: Справочник. – Киев: Наукова думка, 1984. – 50 с.

53. **Киберев Г.Н., Богодухов С.П.** Оптимизация режимов термической обработки сверл из стали Р6М5К5 // Технология и организация производства. – 1976. – № 12. – С. 37-39.

54. **Клименко Л.П.** Повышение долговечности цилиндров ДВС на основе принципов переменной износостойкости / Под ред. В.В. Запорожца. – Николаев, 2001. – 294 с.

55. **Коваленко В.С., Головко Л.Ф., Забелин В.А.** Повышение износостойкости металлорежущих инструментов с помощью лазерного излучения // Технология и организация производства. – 1982. – № 2. – С. 49.

56. **Коваленко В.С., Приходько Н.И., Стрижок А.И.** Поверхностное упрочнение деталей с помощью лазера // Технология и организация производства. – 1975. – № 7. – С. 47.

57. **Кокора А.Н., Зулаев В.Б., Коряев Е.Н.** Лазерное поверхностное упрочнение деталей оборудования, инструмента // Электрофизические и электрохимические методы обработки металлов. – 1978. – С. 127-135.

58. **Кондратьев Е.Т., Кондратьев В.Е.** Восстановление наплавкой деталей сельскохозяйственных машин. – М.: Агропромиздат, 1989. – 95 с.

59. **Корсанов В.Д.** Справочник мастера по штампам. – М.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1972. – 191 с.

60. **Котомина А.А., Шарлай А.Э.** Новые защитные покрытия для крепежных деталей в морской атмосфере // Технология и организация производства. – 1981. – № 3. – С. 51.

61. **Кошарская Л.В., Евдокимов В.Д.** Влияние электромагнитных полей и высокоскоростного трения без смазки на микротвердость поверхностных и глубинных слоев сталей // Тема. – 1999. – № 2. – С. 40-45.

62. **Лабунец В.Ф.** и др. Износостойкие боридные покрытия. – Киев: Техника, 1989. – 158 с.

63. **Ливщиц М.И., Харламов Ю.А.** Повышение стойкости матрицы гибочного штампа детонационно-газовым напылением // Технология и организация производства. – 1980. – № 2. – С. 32.

64. **Лоскутов В.Ф., Хидняк В.Г., Пальщин Г.И.** Нанесение карбида циркония на поверхность сплавов Т15К6 и ВЕ8 // Технология и организация производства. – 1979. – № 3. – С. 30.

65. **Лошак М.Г.** Упрочнение твердых сплавов. – Киев: Наукова думка, 1977. – 147 с.

66. **Мартынов И.Н.** Установка для упрочнения инструмента // Машиностроитель. – 1980. – № 10. – С. 24-25.

67. **Материалы** и методы упрочнения для инструмента полугорячего выдавливания стальных поковок / А.М. Рогалев, А.П. Штаков, А.С. Крыжановский, Т.И. Зинченко // Поверхностное упрочнение деталей и штампов кузнечно-прессовых машин. – Воронеж, 1979. – С. 76-96.

68. **Мельников П.С.** Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1979. – 296 с.

69. **Молодык Н.В., Зенкин А.С.** Восстановление деталей машин: Справочник: – М.: Машиностроение, 1989. – 480 с.

70. **Муханов И.И., Сиднеев В.И.** Упрочняюще-чистовая обработка стальных деталей лучом лазера и ультразвуковым инструментом // Новые методы упрочнения и обработки металлов. – Новосибирск: НЭТИ, 1979. – 218 с.

71. **Наплавка** ножей измельчителей полимерных материалов / А.П. Чистяков, Ю.Д. Мышко, В.Г. Нечипоренко, С.В. Погорельский // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1977. – № 8. – С. 28.

72. **Настасюк И.Г., Глазов Ю.Г.** Повышение стойкости инструмента электроискровым легированием // Технология и организация производства. – 1978. – № 3. – С. 49-50.

73. **Никандрова Л.И.** Химические способы получения металлических покрытий. – М.: Машиностроение, 1971. – 104 с.

74. **Ницевич А.Д.** Технология восстановления длинных крупногабаритных валов сельскохозяйственных машин электрическим хромированием: Дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03. – Одесса, 1987. – 180 с.

75. **Одинцов Л.Г.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.

76. **Определение** режимов лазерной термообработки инструментальных сталей / В.С. Великих, В.П. Гончаренко, В.С. Картавцев и др. // Технология и организация производства. – 1979. – № 1. – С. 32.

77. **Павленко В.Ф.** Повышение стойкости пресс-форм путем нанесения вольфрамоникелевого покрытия // Технология и организация производства. – 1983. – № 2. – С. 51.

78. **Павловская К.К., Романенко Л.Ф.** Перспективы замены цианистых электролитов бесцианистыми // Технология и организация производства. – 1974. – № 6. – С. 13.

79. **Полевой С.Н., Евдокимов В.Д.** Упрочнение машиностроительных материалов. – М.: Машиностроение, 1994. – 496 с.

80. **Папшев Д.Д., Пронин А.М.** Влияние соотношения технологических факторов на степень упрочнения при обработке методами поверхностного пластического деформирования // Новые методы упрочнения и обработки металлов. – Новосибирск: НЭТИ, 1979. – 218 с.

81. **Папшев Д.Д., Пронин А.М.** Фрикционно-контактная усталость поверхностей при обработке методами поверхностного пластического деформирования: Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции "Теория трения, износа и смазки". – Ч. III. Смазочное действие. Контактные задачи при трении. – Ташкент, 1975.

82. **Папшев Д.Д., Човнык Л.Н., Маслова Л.Э.** Повышение износостойкости режущего инструмента модифицированием поверхностного слоя с упрочнением // Новые методы упрочнения и обработки металлов. – Новосибирск: НЭТИ, 1979. – 218 с.

83. **Певзнер В.Х., Комисаренко Р.И.** Упрочнение инструмента плазменным напылением // Технология и организация производства. – 1976. – № 11. – С. 48-49.

84. **Пемехов Г.К., Перпери М.М.** Повышение стойкости инструмента и техоснастки электроискровым легированием // Технология и организация производства. – 1978. – № 3. – С. 51-52.

85. **Перепичка Е.В.** Очистно-упрочняющая обработка изделий щетками. – М.: Машиностроение, 1989. – 136 с.

86. **Перерозин М.А.** Справочник по алмазной обработке стекла. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.

87. **Перняк В.Ф., Шаров А.Д., Голубец В.М.** Электроэрозионное упрочнение ковочных штампов // Технология и организация производства. – 1974. – № 1. – С. 49.

88. **Повышение** износостойкости режущего инструмента из стали Р6М5 / М.С. Борушко, В.Н. Барков, В.М. Береснев, С.А. Тихонов // Технология и организация производства. – 1978. – № 2. – С. 41.

89. **Повышение** износостойкости штампов методом электроискрового упрочнения / В.И. Андреев, Н.И. Беда, Б.И. Гинзбург и др. // Технология и организация производства. – 1974. – № 7. – С. 53.

90. **Повышение** стойкости инструмента вакуумным напылением / Г.П. Богачев, В.П. Гончаренко, А.И. Маслов, А.Т. Суслов // Технология и организация производства. – 1976. – № 11. – С. 47-48.

91. **Полевой С.Н., Евдокимов В.Д.** Обработка инструментальных материалов. – Киев: Техника, 1980. – 150 с.

92. **Попилов Д.Я.** Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: Справочник. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.

93. **Применение** лазерной закалки для поверхностного упрочнения инструментальных сталей / Е.В. Бративник, В.С. Великих, В.С. Картавцев, А.И. Маслов // Технология и организация производства. – 1980. – № 1. – С. 42.

94. **Редько С.Г., Басков Л.В., Герасимов А.А.** Повышение стойкости быстрорежущего инструмента // Станки и инструмент. – 1975. – № 1. – С. 24.

95. **Режущие** свойства инструментов с износостойкими покрытиями и их применение в автостроении / П.А. Брахман, А.И. Григоров, М.Д. Киселев, Ю.А. Лопухин // Технология автомобилестроения. – 1980. – № 1. – С. 10-13.

96. **Романенко А.А., Яценко Н.Н., Кудря Г.А.** Особенности технологии электроискрового упрочнения инструмента // Технология и организация производства. – 1977. – № 3. – С. 52-54.

97. **Савчак К.А., Некрасов В.М.** Повышение износостойкости штампов холодного деформирования // Технология и организация производства. – 1979. – № 4. – С. 31.

98. **Сац Е.Ф.** Применение способа местного хромирования при ремонте оборудования // Технология и организация производства. – 1982. – № 4. – С. 52.

99. **Смольников Е.А., Ткаченко В.И.** Влияние обработки в жидкостном азоте на стойкость режущего инструмента // Станки и инструмент. – 1980. – № 6. – С. 22-24.

100. **Смольников Е.А., Шевченко А.Н., Ткаченко В.И.** Особенности термической обработки прецизионного зуборезного инструмента // Станки и инструмент. – 1977. – № 4. – С. 27-29.

101. **Справочник** по технологии лазерной обработки / Под. общ. ред. В.С. Коваленко. – Киев: Техника, 1985. – 167 с.

102. **Станко Я.Н.** Лабораторные работы по материаловедению для столяров, плотников и паркетчиков: Уч. пос. – М.: Высш. шк., 1989. – 112 с.;

103. **Сторожев В.П.** Причины и закономерности постепенных отказов основных триботехнических объектов энергетической системы судна и повышение их ресурса. – Одесса: ТЭС, 2001. – 341 с.

104. **Стойчев П.Н.** Теоретическая оценка работы образования кристаллического зародыша при осаждении гальванических покрытий в режиме резонанса переменных составляющих тока // Тема. – 1998. – № 7. – С. 6-10.

105. **Сулина А.М.** и др. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

106. **Тарасов А.Н.** Химико-термическая обработка шлицевых отрезных фрез из быстрорежущих сталей // Технология и организация производства. – 1978. – № 2. – С. 41.

107. **Тимошенко В.А., Иванов В.И., Коваль Н.П.** Оптимизация параметров поверхностного слоя инструмента, формируемого электроискровым легированием // Электрофизическая обработка металлов. – 1979. – № 5. – С. 82.

108. **Ткаченко Ю.Г., Парканский Н.Я., Юрченко Д.З.** Износостойкость покрытий, полученных электроискровым нанесением порошков в электрическом поле // Электронная обработка металлов. – 1980. – № 2. – С. 31-33.

109. **Увеличение** долговечности ведущих дисков гидрокоробки автобуса ЛАЗ / В.Ф. Булич, Н.Я. Шевченко, А.И. Величко, З.В. Лисогорова // Технология и организация производства. – 1978. – № 3. – С. 39.

110. **Упрочнение** инструментальных сталей на лазерной установке "Квант-18" / Е.Ц. Браславский, В.П. Гончаренко, В.С. Картавцев и др. // Технология и организация производства. – 1983. – № 1. – С. 51.

111. **Федюкин В.Ф., Труш Н.А., Дмитриев П.А.** Применение электроискрового упрочнения инструментов из быстрорежущих сталей // Технология и организация производства. – 1975. – № 9. – С. 54.

112. **Фиргер И.В.** Термическая обработка сплавов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1982. – 304 с.

113. **Футорянский Ю.В.** Эффективные методы упрочнения стальных изделий. – Куйбышевск. кн. изд-во, 1978. – 88 с.

114. **Хворостухин Л.А.** и др. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением. – М.: Машиностроение, 1988. – 144 с.

115. **Хромирование** шеек крупногабаритных валов / Г.С. Волкова, Э.Н. Картошкин, К.М. Гланцева, В.Е. Хабенко // Технология и организация производства, 1977. – № 3. – С. 58.

116. **Шельвинский Г.И., Клинов А.А.** Гидродробеструйное упрочнение штампов холодной штамповки // Поверхностное упрочнение деталей машин и инструментов. – Куйбышев, 1976. – 341 с.

117. **Шилов П.М., Руденко В.А., Банатов А.П.** Упрочнение стальных деталей при электромагнитной обработке // Технология и организация производства. – 1980. – № 4. – С. 45.

118. **Электрохимическое** полирование изделий из инструментальной стали / В.В. Орехова, Ф.К. Андрющенко, А.Г. Мозговая и др. // Технология и организация производства. – 1979. – № 1. – С. 41.

119. **Юдицкий А.И., Дорофеева А.И.** Повышение стойкости металлорежущего инструмента из быстрорежущей стали // Технология и организация производства. – 1976. – № 9. – С. 38-39.

120. **Юрасов С.А., Кариман М.Г., Соколова Н.Х.** Износостойкое диффузионное покрытие на инструментальных сталях // Химико-термическая обработка металлов и сплавов. – Минск, 1977. – С. 184-185.

121. **Юстенсон А.А.** Азотирование в жидких средах // Металловедение и термическая обработка. – 1974. – № 3. – С. 42.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

К РАЗДЕЛУ I

А

Азотирование 88 – Интенсификация процесса 93-95 – Контроль азотированного слоя 91 – Область применения 88-89 – Операции 88, 89 – Оптимальные режимы 88, 90-91 – Печи для азотирования 88 – Подготовка деталей 88 – Продолжительность процесса 89 – Режимы термообработки перед азотированием 90 – Средняя скорость 90
– быстрорежущих сталей 91
– быстрорежущей стали для штампов 92
– газовое: при повторении циклов вакуумирования и подаче реагирующего газа 92-93; при различной длительности процесса насыщения 94
– жидкостное – Расплавы солей 85 – Режимы 91-92
– инструментальных сталей 92 – Режимы 92
– ионное в тлеющем разряде 101 – Технология процесса 101-102 – Область применения 102
– стали – Режимы 90
– твердое 92
– технологической оснастки 88
Активизация поверхности – см. *Декапирование*
Алитирование 132 – Режимы 133 – Технология процесса 132
– в расплаве – Составы флюсов 134
Анодирование – см. *Оксидирование электротехническое*
– алюминиевых деталей – Причины возникновения и способы устранения дефектов 169
Аппарат криогенный передвижной 68
Атмосферы контролируемые 51, 52 – Классы атмосфер, область их применения и составы 53 – Температуры: воспламенения газовых компонентов 52, точек росы газов 53
– печей при нитроцементации 78
Аустенизация стали – Температура нагрева ТВЧ в зависимости от времени аустенизации 23
– быстрорежущей 28

Б

Биникелирование 156 – Составы электролитов 156, 157
Борирование 103 – Насыщающие смеси 103 – Режимы 106
– безэлектролизное жидкостное 107 – Оборудование, составы растворов 107 – Способы увеличения толщины слоя и повышения его износостойкости 108 – Технология процесса 107
– в порошке – Состав и приготовление порошков 104, 106 – Упаковка деталей 105
– газовое в диборане 109
– газовое, в жидкости, электролизное стали 104
– диффузионное деталей технологической оснастки – Режимы 105
– пастами – Интенсификация процесса 110 – Составы паст 109 – Технология процесса 109
– точных и высокоточных деталей 103
– углеродистой стали 103
– штампового инструмента 105
Бороалитирование 115 – Свойства обработанных поверхностей 115 – Технология процесса 115
Боромеднение – Назначение процесса, состав смесей, режимы 114
– диффузионное 115
Боросульфидирование 110 – Состав смеси 110
– низкотемпературное 110
Борохромирование – Назначение процесса, используемое оборудование 110 – Насыщающая смесь 112
– Повышение износостойкости обработанных поверхностей 113 – Режимы 112 – Составы насыщающих смесей 112

– диффузионное цветных сплавов 112
– мартенситостареющих сталей 112
– местное интенсивное крупных деталей 113
– штампов – Состав насыщающих смесей 111
– электролизное диффузионное 111
Бороцирконирование 116 – Состав насыщающей смеси 116 – Электролизное 116

В

Ванадирование 122 – Насыщающие смеси 123 – Технология процесса 122
– инструментов из малолегированной быстрорежущей стали в порошковых смесях 123
– штампов и пресс-форм из инструментальных сталей 123
Ванны для термообработки инструмента – Рекомендуемые составы 30
– для термообработки сталей и др. металлов 30
– соляные – Нагрев под закалку 22 – Составы ванн 24
Вибрационное упрочнение твердых сплавов 263
Вода – Приготовление для растворов 181
Выглаживание алмазное 260

Г

Генератор ультразвуковой – Воздействие на поверхность при абразивной обработке 56
Гидроабразивное упрочнение – назначение процесса 260
– стальных и твердосплавных инструментов 260
Глубиномеры – Определение глубины залегания дефекта 55-56
Гомогенизирующая обработка – Операции 83

Д

Декапирование 145 – Режимы 145
Депассивация поверхности перед азотированием 92
Дефектоскопы магнитные – Применение 55
Дефекты покрытий при анодировании алюминиевых сплавов – Причины возникновения и способы устранения 169
– при электролитическом никелировании 154-155
– при электрополировании стали – Причины и способы устранения 162
– хромовых, полученных в сульфатных электролитах 150-151
Деформирование поверхностное пластическое – Применение 254
Деформирование поверхностное при обкатке роликами 255 – Прилагаемое давление 255, 256 – Радиус ролика 257 – Режимы обкатывания 258 – Степени: деформации 257; наклепа 256 – Упрочнение инструмента 259 – Формулы для расчета сил пластического деформирования 257
– с наклепом – Давление на поверхность 258
– шариками 255 – График оптимальных режимов 256 – Кратность прилагаемой нагрузки 255-256
Диффузионное насыщение поверхности карбидами – *см. Инструмент из быстрорежущей стали*
Добавки комплексообразующие 196

З

Закалка 12 – Время прогрева цилиндрических и квадратных заготовок 26, 27 – Выбор сред, температуры и скоростей охлаждения 27, 28 – Нагрев под закалку 22, 27 – Расчет продолжительности предварительного подогрева и окончательного нагрева инструментов и технологической оснастки 25-26 – Режимы охлаждения 27 – Соотношение времен подогрева предварительного и окончательного 24 – Способы закалки 12-13, 19-21
– в двух жидких средах 19
– изотермическая 19 – Режимы 20
– несквозная, обычная, сквозная с самоотпуском, чистая 19-20
– неполная 12
– полная 12
– при ограниченном пребывании в охлаждающей среде 19

– светлая 21
– с непрерывным охлаждением 13
– с подстуживанием 19
– с последующей обработкой холодом 21
– ступенчатая 19
Закалка инструмента – Особенности 21
– из вольфрамомолибденовых сталей 22
Закалка лазерная – Выбор параметров излучения: критической энергии 202; плотности падающей энергии 203 – Коэффициент перекрытия пятен закалки 203 – Критические режимы 202 – Назначение процесса 201 – Особенности процесса 201 – Упрочняемые стали 201 – Схемы управления перемещением лазерного луча 204
– инструментальных сталей – Режимы 202
– протяженных кромок инструмента 203
Закалка сталей инструментальных – Критические диаметры заготовок 28
– инструментальных ступенчатая – Режимы 20
– кобальтовых 22
– конструкционных – Режимы 13-16
– пружинных общего назначения – Температуры и среды 18
– коррозионно-, кислото- и окалиностойких 17
– углеродистых 12 – Продолжительность нагрева и выдержки при закалке 26
– цементуемых конструкционных – Режимы 18

И

Ингибиторы травильных растворов 143-144
Инструмент из быстрорежущей стали – Диффузионное насыщение поверхности карбидами металлов 84
Испарение термическое – Качество очистки поверхности 250 – Увеличение прочности покрытия из газовой фазы 248

К

Кадмирование – Составы электролитов 155
Карбидизация газовая 81 – Интенсификация поверхности 82
– поверхностно-диффузионная сложнолегирующими веществами 128
Карбованадийтитанирование 124 – Насыщение смеси 124-125 – Свойства диффузионного слоя 125
Карбюризаторы для газовой карбидизации 82
– для газовой цементации 82 – Продолжительность нагрева в карбюризаторе 75
– для нитроцементации 77 – Составы 78
– твердые для цементируемых сталей – Составы 69
Карбонитрирование 85 – Обрабатываемый инструмент 85 – Операции 86
– заготовок из аустенитных сталей 87
– инструмента основных видов – Микроструктура слоя 87 – Продолжительность процесса 86-87 – Твердость поверхности 85
Контейнеры для упаковки деталей 105
Контроль качества термической обработки, приборы 54
– люминесцентным методом поверхностных дефектов 55
– методом импульсной ультразвуковой дефектоскопии 55
– сплошности металлов дефектоскопом 55
– твердости термообработанных поверхностей 55
Криоагенты – Температура кипения 65 – Характеристики 67
Криогенное упрочнение сталей – Влияние на свойства сталей 59 – Графики режимов 63 – Задачи и целесообразность проведения процесса 58-60 – Коэффициент структурного расширения структурных составляющих сталей 59 – Особенности обработки технологической оснастки 60 – Стабилизация остаточного аустенита 60 – Температура начала и конца мартенситного превращения углеродистой стали 59, 61-62
– инструментальных 63 – Обработка деталей особосложной конфигурации и технологической оснастки высокой точности 63

Л

Легирование поверхностное крупногабаритных деталей 229
– электроискровое 244

М

Материалы абразивные 56
– для изоляции поверхностей, не подлежащих хромированию, в виде накладок 148; мастичные 148; пленочные 148
– присадочные для наплавки: на основе кобальта 224; на основе никеля 225
– твердосплавные и из высокохромистого чугуна 224
Меднение – Составы электролитов 156
Металлиды – Сплавы и порошки для нанесения покрытий 240

Н

Нагрев в вакууме заготовок из инструментальных сталей 29
– стали при термообработке 24-25
– стали под закалку – Печи, соляные ванные 22 – Повышение: износостойкости инструментов 27; стабильности режущих свойств 22, 27 – Температуры нагрева 21
– стали под закалку в псевдоожиженном слое 28-29
Наклеп 254 – Интенсивность наклепа 254 – Параметры процесса 254-255
Напильники тарированные – Изменение твердости 55
Наплавка – Вибрация электрода 220 – Глубина проплавления 216 – Оптимальные режимы 220 – Подготовка наплавляемых поверхностей, форма разделки фасок 211-212 – Режимы наплавки 213 – Твердость наплавленного слоя 218 – Технология процесса 212 – Электроды 211
Наплавка автоматическая в среде углекислого газа 220 – Режимы 221 – Рекомендуемые составы газовых сред 221
– металлокерамическими лентами – Режимы 220
– низкоуглеродистыми и низколегированными сталями 216
– под флюсом – Режимы 213
– порошковой проволокой и лентой – Режимы при наплавке проволокой 219 – Химический состав наплавленного металла 217
– электродной проволокой 218
Наплавка аргонодуговая фасонных поверхностей инструментов для горячего прессования 224, 227
– биметаллических штампов 218 – Технология изготовления наплавляемых штампов 218
– вибродуговая: автоматическая в защитной среде водяного пара 221; в среде углекислого газа 222
– газоплазменная – Присадочные сплавы 224
– газопорошковая – Характеристики наплавляемых материалов 237 – Химический состав порошковых сплавов 238
– деталей, работающих при умеренной нагрузке 227
– дисперсионно-твердеющими сталями 225
– инструментов из быстрорежущей стали 228
– легирующими металлами – Назначение процесса 211
– локальная электроконтактная порошками из легирующих элементов 229
– металлокерамическими лентами 218
– многослойная 212
– открытый дугой – Преимущества 217
– плазменная композиционных порошков 231 – Режимы 232
– порошковыми проволоками и легированными электродами – Режимы 228 – Химический состав наплавленного металла 228
– порошкообразных смесей угольными и графитовыми электродами – Режимы 215
Наплавка ручная аргонодуговая 215
– ручная дуговая плавящимся электродом – Режимы 215
– рабочих элементов штампов 219
– скоростная твердых сплавов 228
– стеллита – Состав и свойства наплавляемого слоя 205
– углеродистых, низколегированных и хромистых сталей 211
– универсальными методами с использованием теплоты газового пламени 223

– хромоникелевого покрытия с включениями карбидов вольфрама 229
– чугунных деталей – Технология процесса 213
– электрошлаковая проволочным электродом – Режимы 214
Напыление газотермическое – Особенности покрытий 237 – Химический состав титановых покрытий
– детонационное 237 – Характеристики порошков 237-238 – Химический состав покрытия 239
– износостойких прочных покрытий – Методы 236
– плазменное: композиционных порошковых материалов 231; нитридов и карбидов 232; чистых материалов и неметаллов 233
Насыщение диффузионное металлов – Способы интенсификации процессов 136 – Технология процесса 136-137
Никелирование химическое – Получение износостойких покрытий 180 – Преимущества 176
– алюминия – Назначение процесса 184 – Предварительная обработка поверхности 185 – Составы растворов 185 – Удаление некачественного покрытия 185
– в кислых растворах – Корректирование растворов 178 – Приготовление растворов 181 – Применение 176 – Рецептура одноразовых растворов 177
– магниевых сплавов – Подготовка поверхностей 186 – Применяемые растворы 186
– меди и ее сплавов – Растворы 184 – Снятие некачественного покрытия 184
– пресс-форм – Операции 187 – Составы растворов и параметры процесса 187
– свинца, олова и их сплавов 187
– стали – Используемые растворы 183 – Снятие некачественного покрытия 183
– титана 185 – Подготовка поверхности 185-186 – Прочность сцепления покрытия с поверхностью детали 186
– цинковых сплавов 187
– щелочное – Корректирование растворов 181 – Применение 179 – Растворы многоразового использования 180 – Составы растворов 179-181
Никелирование электролитическое – Контроль качества покрытия 154 – Операции 151 – Составы электролитов, режимы 152 – Технология процесса 151
– блестящее и матовое – Составы электролитов 153
– пресс-форм и литейных форм 152 – Составы электролитов 153
Никель – Осаждение из раствора 176
Никель-борирование – Назначение процесса и его параметры 194-196 – Приготовление растворов 195-196 – Температурные режимы 197 – Составы растворов 193-195
Никель-кобальт-фосфатирование – Зависимость толщины покрытия от состава раствора, корректирование растворов 192 – Назначение процесса 190 – Оборудование 191 – Режимы 192 – Состав покрытий 192-193 – пресс-форм – оборудование 191 – Состав растворов и их приготовление 191 – Технологические операции 190 – Требования к шероховатости обрабатываемой поверхности 190
Никель-фосфатирование – Контроль толщины покрытия 189 – Корректирование раствора 188 – Назначение процесса 188 – Преимущества процесса 190 – Применяемость покрытия 190 – Снятие недоброкачественного покрытия 189 – Термическая обработка химического никеля 189 – Технологические операции 188
– инструментов – Составы растворов, режимы процесса 188
Ниобирование 129
Нитроцементация – Выполняемые операции 78-79 – Зависимость глубины слоя от температуры и времени выдержки 79 – Печи 78 – Подготовительные операции 78-79 – Продолжительность и средняя скорость процесса 79-80
– высокотемпературная – Режимы 80
– инструментов из быстрорежущей стали 79-81
– низкотемпературная 77
– пастами – Составы паст 83
Нормализация стали 11-12 – Диаграмма температур 10

О

Обмазки защитные – Рекомендации по изготовлению и применению обмазок, составы 71 – Технологии приготовления 72
Оксидирование электрохимическое 163 – Получение толстых пленок 168 – Типы покрытий 163
– сложнопрофильных деталей 168
Осаждение электрофоретическое – Материалы покрытий 158 – Образование композиционного покрытия 158 – Режимы 159 – Технологические операции 158-159

Оснастка технологическая – Восстановление методами криогенной обработки 64 – См. также *Криогенный метод упрочнения сталей инструментальных* (*обработка технологической оснастки высокой точности*)
Отжиг метчиков 11
Отжиг сталей – Схемы отжига 11 – Цель проведения 9
– диффузионный 10 – Режимы 11
– изотермический 10 – Режимы 11
– изотермический инструментальных сталей – Режимы 12
– инструмента из быстрорежущей стали 11
– на зернистый перлит, низкотемпературный, неполный 9
– полный 9
– рекристаллизационный 9
– циклический – Схема 10
Отпуск – Стабилизация размеров и форм деталей 65
– дополнительный после заточки и шлифования 34
– конструкционных сталей – Режимы 13-16
– конструкционных цементуемых сталей 18
– пружинных сталей – Температура и среда 18
– теплостойких сталей – Режимы 17
Отпуск закаленных сталей – Понятие, цель проведения 31-32 – Режимы 32-33 – Твердость легированного инструмента отпуска 35 – Типы отпуска 32
– в ванной или печах с газовой атмосферой 32
– кратковременный 32
– на цвет побежалости 33
Охлаждение деталей 75
Очистка абразивная гидравлическая 56
– металлическим песком 56
– поверхностей заготовок после термообработки 56
– регенерированными зернами 56
– от окалины 56
– ультразвуковая 56 – Последовательность выполняемых операций 57

П

Паром обработка быстрорежущего инструмента – Оборудование, технология процесса 135-136
Пассивирование – Рекомендуемые составы 157
Пасты для диффузионного борирования 113
– для нитроцементации 83
– для цементации – Приготовление, составы 73
– твердые – Состав и использование 200
Пленки фосфатные – Контроль коррозионной стойкости, определение защитных свойств 175
Покрытия высокой коррозионной стойкости 157
– детонационные – Твердость 239 – Физико-механические характеристики 239
– из нитрида титана на твердосплавных пластинах 250
– многокомпонентные – Виды покрытий 192-193 – Технология процесса 194
– многослойные на твердосплавных пластинах 251
– нитридные – Получение 102
– осаждаемые в вакууме катодно-ионной бомбардировкой 251
– порошковые – Детонационный метод нанесения 230 – Увеличение адгезионной прочности и термостойкости 234
– ферроборное – Состав, толщина 114
– электрофоретическое композиционное с металлической или полимерной матрицей 158 – Материалы покрытий 159
Полирование электрохимическое – Выбор электролитов 160 – Качество полимеров 161 – Назначение процессов 159-160 – Свойства полированных поверхностей 160
– изделий из коррозионно-стойких сталей – Режимы, технологические операции 162 – Состав электролита 163
– инструмента – Технология процесса 160
– инструмента из быстрорежущей и углеродистой сталей – Состав электролита 163
– плашек – Режимы, состав электролита 161

Правка в горячем состоянии 53
– в холодном состоянии 54
– в штампах 54
– с подогревом 54
Приборы для замера криогенных температур 64
– контроля криогенных температур 68
Приспособления для крепления деталей 96, 98
Проволока сварочная и наплавочная для автоматической наплавки деталей 216
Прокаливаемость сталей – Влияние частоты электрического тока 23

Р

Распыление ионно-плазменное 247

С

Сглаживание электромеханическое – Параметры процесса 274
Силицирование – Назначение процесса 134
– в газовых средах 135 – Режимы 134
– в порошкообразных смесях 135 – Режимы 134
Смазки твердые – Назначение процесса 198 – Составы 198
– для инструментов – Повышение стойкости 199 – Технология процесса 199
– для стальных деталей и инструмента при упрочнении их механическими методами 200
– молибденовые – Состав 199
Сплавы для индукционной и газоплазменной наплавки – Составы 226
– никелевые – Нанесение газотермическим способом 240
Среды газовые – Режимы наплавки в среде углекислого газа 221 – Рекомендуемые составы 221
Стабилизаторы растворов 196
Старение – Понятие 34 – Цель проведения 34-37
– теплостойких сталей – Режимы 17
Стеллит – *см. Упрочнение лазерное стеллита*
Сульфидирование – Контроль качества 130 – Назначение процесса 129
– технологической оснастки – Насыщение смеси, технология процесса 130
Сульфоцианирование – Контроль качества 132 – Назначение процесса 130 – Оборудование 132 – Режимы 132 – Составы смесей 131

Т

Температуры криогенные – Источники температур 65 – Стабилизация форм и размеров деталей 64 – См. также *Приборы контроля криогенных температур*
Термометры 55
Термонапыление – Используемые порошки 234 – Недостатки 234
Термообработка в контролируемой атмосфере – См. *Атмосферы контролируемые*
– зенкеров 41 – Параметры технологических процессов, оборудование 43
– калибров-пробок 47 – Последовательность операций 47 – Продолжительность отпуска 47
– метчиков – Продолжительность нагрева под закалку 42
– плашек – Контроль твердости, охлаждение тангенциальных плашек 45 – Продолжительность нагрева круглых плашек 45
– протяжек 46 – Условия проведения процесса 46-47
– резцов из быстрорежущей стали 42
– сверл из стали: быстрорежущей 40; углеродистой или легированной 40 – Приспособления для нагрева 40
– скоб и шаблонов 47
– фрез: прецизионных 44; сборных 44 – Последовательность операций 44 – Продолжительность нагрева под закалку 44
– штампов – Проводимые операции 47-51 – Режимы 48 – Температура отжига 47, 49
Термоциклирование – Увеличение интенсивности азотирования, цели проведения 93
Титаноалитирование – Назначение процесса, технология, режимы 133
Травление – Назначение процесса 143 – Растворы: для снятия шлама 145; для травления черных металлов 143 – Снятие травильного шлама 144-145

У

Улучшение – Понятие, цель проведения 34 – Температуры 36
– легированных сталей – Последовательность операций 34
Упрочнение ионно-плазменное – Применение 247 – Способы получения покрытий и их свойства 247
– комплексное 205, 222
– лазерное стеллита 204
– металлов – Классификация методов 7-9 – Термические методы 9
– методом воздействия магнитным полем 206-209
– сталей насыщением углеродом 69

Ф

Флюсы для наплавки – Марки 9
Фосфатирование – Качество фосфатной пленки 175 – Назначение процесса 171 – Оборудование 171 – Операции и режимы подготовки деталей к фосфатированию 171 – Режимы 171-172 – Операции процесса 171
– деталей подшипников 172
– инструментов 171
– низкотемпературное крепежных деталей 173
– с одновременным обезжириванием и травлением 173
– стальных деталей 171
– химическое с последующей пропиткой дисульфидмолибденовой смазкой 173
Хромоалитирование – Источники хрома 117 – Назначение процесса 122
Хромоборирование – Способы проведения 117 – Приготовление хромирующих смесей и их недостатки 117-118 – Упаковка изделий в ящики 118
Хромирование диффузионное – Интенсификация процесса 118 – Назначение процесса 118 – Разновидности процесса, составы смесей 117 – Увеличение толщины хромированного слоя 119
– диффузионное, вакуумное 119
– диффузионное пастой 119
– местное электролитическое безванным способом 148-150
– твердое износостойкое – Оборудование 147 – Режимы 145 – Состав электролита
– электрохимическое твердое 145
Хромосилицирование – Назначение процесса 120
– жидкостное в расплаве 120
– сложное диффузионное 121
– термодиффузионным легированием 121
Хромотитанирование – Назначение процесса, составы смесей, режимы 120
– Диффузионное твердосплавных пластин 120

Ц

Цементация – Ящики для упаковки 69-70
– в жидкой среде 74 – Режимы 74
– в пасте 73 – Операции 73
– высокотемпературная 83
– газовая 75 – Глубина цементованного слоя, операции 75-76 – Расход карбюризатора 75 – Режимы 75
– газовая инструментов 76
– газовая частичная 75
– конструкционная сталей – Режимы 18
– литого инструмента 83
– стали в твердом карбюризаторе 69
Цианирование 135
Цианирование жидкостное – Контроль качества 100 – Очистка после цианирования 100 – Подготовка деталей перед цианированием 98 – Составы сред 95-97 – Технология процесса 95 – Цель проведения, оборудование 96, 97 – Число деталей в партии 100
– высокотемпературное – Глубина слоя, время выдержки 99 – Составы сред для ванн 97
– низкотемпературное – Время выдержки 98 – Глубина слоя 99 – Составы сред 95, 99
– среднетемпературное – Составы сред 96

Цианирование твердыми карбюризаторами и пастами 101 – Глубина слоя 102 – Составы смесей и паст 101
Цинкование пирофосфатное – Режимы 156 – Состав электролита 156
Циркосилицирование – Назначение процесса, насыщающие среды 126 – Технология процесса 126-127 – твердых сплавов 127
Циркотитанирование – Глубина слоя 125 – Назначение процесса, насыщающая среда 125 – твердых сплавов 125-126

Ч

Чеканка – Инструменты 261
– вибрационно-упрочняющая 261 – Контактное давление 262 – Продолжительность обработки и сила микроудара 262 – Режимы 262
– ротационная 261

Ш

Шлам 144 – Растворы для снятия шлама 145
Штампы ковочные – Повышение эксплуатационной стойкости 76-77

Щ

Щетки металлические – Максимальная толщина упрочненного ими слоя 267 – Разновидности щеток 266-267 – Рекомендации по обработке поверхностей 268 – Характеристики процесса 267 – Формирование рельефа поверхности 266
– дисковые – Режимы работы 266

Э

Электроды для наплавки легированными и углеродистыми сталями 211
– для электроискрового упрочнения 246
– спеченные 211
Электроискровое упрочнение – Применение 241 – Режимы 243-245 – Свойства упрочненного слоя 241-242 – Технологические рекомендации 243 – Электрическая схема устройства 241
Электромеханическая пластическая обработка – Выбор режимов 274-275 – Конструкция деформирующего инструмента 277 – Назначение процесса, его особенности 273 – Параметры процесса 278-279 – Твердость и глубина упрочненного слоя 276
– быстрорежущих и высоколегированных инструментальных сталей 279
– высокотемпературная 276
– деталей сложной конфигурации 273-274
– колец 278
– при высоких режимах упрочнения 273
Электролиты бесцианистые – Составы 155
Энергией взрыва упрочнение поверхностей – Взрывчатые вещества 272 – Источники энергии 272 – Передающие среды 271 – Повышение износостойкости поверхностей 270 – Схемы упрочнения 271 – Форма заряда 272
Эпиламирование – Назначение процесса 197 – Технология процесса 198 – Характеристики растворов 197

К РАЗДЕЛУ II

А

Активирование – Определение 321

Д

Древесина – Пропитка 317 – Сушка 310 – Упрочнение 310

З

Закалка стекла 290 – Продолжительность нагрева 293

К

Консервирование – Определение 310
Коэффициенты: $A_в$ (значение) 316; $A_ц$ (значение) 316

О

Огнезащита – Определение 310
Отжиг стекла 288 – Высшая температура 289
– Контроль качества 290
– Пример расчета режимов 290
– Печи отжигательные – Характеристики 292
– Температурный режим 289
– Формулы для расчета режимов 291, 292

П

Пластмассы – Подготовка к металлизации 321
– Составы адгезионных лаков 324
– Упрочнение металлизацией 321-334
– Химическое меднение 326 – Составы растворов 327 – Составы электролитов 328
– Химическое никелирование 329-334
Плотность – Определение 285
Показатель преломления луча света – Формула 287
Покрытия поверхностные – Характеристика 293
Полирование стекла 295 – Технологические характеристики 296 – Химические реакции 296
Пропитка древесины 317 – Определение качества 319-321
– препаратами биоогнезащитными – Составы 317-318
– препаратами класса ПЛ и ПМ на основе ПХФ – Составы 318-319
Прочность – Определение 287

С

Сенсибилизация – Определение 321
Составы СОЖ для обработки стекла 302, 305-306 – Применяемость по видам технологических процессов 302, 305
Стекло – Влияние оксидов на свойства 285-286
– Дефекты и способы их устранения 300
– Закалка 290 – Продолжительность нагрева 291, 293
– Ионный обмен 293
– Основные свойства 285-288
– Отжиг 288-290
– Поверхностные покрытия 293
– Полирование 295
– Травление 295
– Упрочнение 285-309: методами механической обработки 300-309; термическими методами 288-295; химическими методами 295-300
Стойкость химическая – Определение 288
Сушка древесины 310-317 – Выбор режима 311
– Исходная продолжительность 313
– Коэффициенты $A_в$, $A_ц$ (значения) 316
– Режимы низкотемпературного процесса 313

Т

Твердость – Определение 287
Теплоемкость – Определение 285

Теплопроводность – Определение 286
Теплопрозрачность – Определение 286
Термостойкость - Определение 287
Тепловое расширение – Определение 286
Травление стекол – С применением покрытий (декоративное 418; матовое 418; светлое 418)
– Покрытия декоративные упрочняющие 295, 297
– Покрытия, выполненные золотом и люстровыми красками – Технологическая характеристика 297
– Покрытия, выполненные силикатными красками 297; содержание красителя 298; составы пигментов 298; составы разбавителей и связующих 299
– Покрытия оксидно-металлические 295; составы иризирующих смесей 295, 297
– Составы защитных покрытий 297
– Составы травильных смесей 297
– Способы нанесения красок 297, 299

У

Упрочнение древесины 310-321
Упрочнение стекла методами механической обработки 300-309 – Зависимость величины "трещиноватого" слоя от зернистости алмазного порошка 302
– Зависимость шероховатости поверхности от концентрации алмазов в инструменте 306
– Применяемость алмазных инструментов 303
– Режимы резания при обработке алмазными кругами 305
– Режимы сверления 307
– Режимы шлифования 307
– Составы СОЖ 302, 306
– Характеристика абразивных шлифующих материалов 301
– Характеристика инструмента 302, 304
Упругость – Определение 287

Учебное издание

ЕВДОКИМОВ Вадим Дмитриевич
КЛИМЕНКО Леонид Павлович
ЕВДОКИМОВА Алла Николаевна

ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Руководитель издательских проектов Е. Прокопчук
Оригинал-макет С. Прокопчук
Дизайн обложки С. Кицно
Редакторы О.Шатун, Т. Грицюк
Младший редактор А. Млеко
Технический редактор, компьютерная верстка А. Шепель

Формат 70x100/16. Подписано в печать 03.07.2006.
Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Тираж 200 экз.

ООО «Изательский дом «Профессионал»
Тел./факс (8-044) 451-45-66 (многоканальный)
e-mail: vdbook@profi-book.kiev.ua,
ruslan@profi-book.kiev.ua
www.profi-book.kiev.ua

Свидетельство о внесении субъекта издательской деятельности в Государственный реестр издателей, изготовителей и распространителей издательской продукции серия ДК № 1533

ISBN 966-336-029-1