

щий аэрацию воды. Отпуск закаленных деталей не производят. После описанной термической обработки изделия из стали 110Г13Л приобретают аустенитную структуру и высокое сопротивление изнашиванию при ударах и давлении.

### Библиографический список

*Бернштейн М. Л.* Термомеханическая обработка металлов и сплавов. Т. 1 и 2. М., «Металлургия», 1966. 1171 с. с ил.

*Бобро Ю. Г., Пивоваров В. М.* Изотермическая закалка чугуна. Харьков, «Прапор», 1968. 109 с. с ил.

*Большаков В. И., Стародубов К. Ф., Тылкин М. А.* Термическая обработка строительной стали повышенной прочности. М., «Металлургия», 1977. 200 с. с ил.

*Вайнштейн В. Д., Канторович В. Н.* Низкотемпературные холодильные установки. М., «Пищевая промышленность», 1972. 350 с. с ил.

*Геден М. В., Соболев Г. П., Паисов И. В.* Термическая обработка валков холодной прокатки. М., «Металлургия», 1973. 344 с. с ил.

*Гудремон Э.* Специальные стали. Т. 1 и 2. М., «Металлургия», 1966. 952 и 676 с. с ил.

*Гуляев А. П.* Металловедение. М., «Металлургия», 1977. 647 с. с ил.

*Каменичный И. С.* Спутник термиста. Киев, «Техника», 1969. 230 с. с ил.

*Колачев Б. А., Ливанов В. А., Елагин В. Н.* Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1972. 480 с. с ил.

*Лахтин Ю. М.* Металловедение и термическая обработка. М., «Металлургия», 1977. 408 с. с ил.

Марочник стали и сплавов. М., НИИМаш, 1971. 482 с. с ил.

Материалы в машиностроении. Справочник. Т. 2. Под ред. Е. П. Могилевского. М., «Машиностроение», 1967. 496 с. с ил.

Металловедение и термическая обработка. Т. 1 и 2. Справочник. Под ред. Н. Т. Гудцова. М., Metallurgizdat, 1962. 1625 с. с ил.

Надежность и долговечность валков холодной прокатки. М., «Металлургия», 1976. 477 с. с ил. Авт.: В. П. Полухин, В. А. Николаев, М. А. Тылкин и др.

*Никберг Н. М., Тищенко А. Н.* Оптимальная долговечность оборудования металлургических предприятий. М., «Металлургия», 1974. 200 с. с ил.

*Новиков И. И.* Теория термической обработки металлов. М., «Металлургия», 1974. 400 с. с ил.

*Родзевич П. И., Никберг И. М., Барац А. И.* Упрочнение деталей металлургического оборудования. М., Metallurgizdat, 1963. 343 с. с ил.

*Рустем С. Л.* Оборудование и проектирование термических цехов. М., Машгиз, 1962. 588 с. с ил.

Тепловые процессы при обработке металлов и сплавов давлением. М., «Высшая школа», 1973. 631 с. с ил. Авт.: Н. И. Яловой, М. А. Тылкин, П. И. Полухин, Д. И. Васильев.

Справочник машиностроителя. Т. 6. Под ред. С. А. Сатяла. М., «Машиностроение», 1964. 540 с. с ил.

Справочник металлиста. Т. 2. Под ред. А. Г. Рахштадта и В. А. Брострема. М., «Машиностроение», 1976. 718 с. с ил.

Термическая обработка крупных поковок. М., «Металлургия», 1973. 176 с. с ил. Авт.: Ю. А. Башнин, И. В. Паисов, В. Н. Цурков и др.

*Тылкин М. А.* Повышение долговечности деталей металлургического оборудования. М., «Машиностроение», 1971. 608 с. с ил.

*Филинов С. А., Фигнер И. В.* Справочник термиста. Л., «Машиностроение», 1975. 352 с. с ил.

*Шубин Р. П., Приходько В. П.* Технология и оборудование термического цеха. М., «Машиностроение», 1974. 280 с. с ил.

## Глава VIII

### ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИНСТРУМЕНТА

#### 1. Фазовые превращения при химико-термической обработке

Химико-термическая обработка деталей состоит из нагрева их до определенной температуры, выдержки при этой температуре в активных газовых, твердых или жидких средах и последующего охлаждения. При химико-термической обработке происходит

изменение химического состава, структуры и свойств поверхности изделий. После некоторых видов химико-термической обработки для достижения более резкого изменения свойств поверхностных слоев изделий дополнительно проводят термическую обработку.

Химико-термическую обработку производят главным образом с целью поверхностного упрочнения деталей машин и инструмента (повышаются поверхностная твердость,

износостойкость, усталостная прочность, красностойкость, задростойкость). В ряде случаев ее выполняют с целью противодействия влиянию на поверхность изделий внешних агрессивных сред при комнатной и повышенных температурах (повышаются устойчивость против коррозии, кислотостойкость, жаростойкость и т. д.).

В зависимости от состава внешней среды химико-термическая обработка может сопровождаться как обогащением, так и обеднением поверхностных слоев металлов и сплавов теми или иными элементами. В подавляющем большинстве случаев применяют виды химико-термической обработки, основанные на поверхностном обогащении металлов и сплавов различными элементами.

Химико-термическая обработка состоит из трех элементарных процессов: диссоциации вещества внешней активной среды, сопровождающейся распадом молекул (не способных в большинстве случаев внедряться в металл из-за больших размеров) на активные атомы (ионы); контактирования атомов диффундирующего элемента с поверхностью стального изделия и проникновения (растворения) их в решетку железа (абсорбция); диффузии атомов (ионов) насыщающего элемента в глубь металла.

Основной величиной, определяющей скорость диффузии, является коэффициент диффузии  $D$  ( $\text{см}^2/\text{с}$ ), под которым понимают количество вещества, диффундирующего через единицу площади ( $1 \text{ см}^2$ ) в единицу времени ( $1 \text{ с}$ ) при перепаде концентрации, равном единице. Чем больше значение коэффициента диффузии  $D$ , тем быстрее протекает процесс диффузии. Величина коэффициента диффузии зависит от температуры и концентрации. Температурная зависимость  $D$  определяется уравнением

$$D = D_0 \exp - Q/RT,$$

где  $D_0$  — предэкспоненциальный множитель, величина которого определяется типом кристаллической решетки металла растворителя;  $Q$  — энергия активации;  $R$  — газовая постоянная ( $\sim 2$ ).

Чем больше величина энергии активации  $Q$ , тем меньше коэффициент диффузии  $D$ . Скорость гетеродиффузии при проникновении атомов насыщающего элемента в решетку железа неодинакова и зависит от характера образующегося твердого раствора. При насыщении углеродом или азотом, образующими с железом твердые растворы внедрения, диффузия протекает легче, чем при насыщении металлами, образующими твердые растворы замещения. Поэтому при диффузионном насыщении металлами и кремнием (диффузионная металлизация) процесс ведут при более высокой температуре и, несмотря на это, получают меньшую толщину слоя, чем при насыщении азотом и особенно углеродом.

Глубина проникновения зависит от температуры и продолжительности насыщения, а также от концентрации диффундирующего элемента на поверхности. С течением времени скорость увеличения толщины слоя непрерывно уменьшается. Толщина диффузи-

онного слоя при прочих равных условиях тем больше, чем выше концентрация диффундирующего элемента на поверхности металла.

Концентрация диффундирующего элемента на поверхности зависит от активности окружающей среды, обеспечивающей приток атомов этого элемента к поверхности, скорости диффузионных процессов, приводящих к отводу этих атомов в глубь металла, и состава обрабатываемого металла. Повышение температуры увеличивает скорость процесса диффузии. Поэтому толщина диффузионного слоя, образующегося за данный отрезок времени, сильно увеличивается с повышением температуры процесса.

Природа первичных образований, фазовый состав и изменение концентрации по толщине диффузионного слоя могут быть описаны с помощью диаграммы состояния металл — растворитель — диффундирующий элемент. Рассмотрим это, используя диаграммы состояния железо — насыщающий элемент (Сг, Al, Ni, Mn и др.) (рис. VIII.1). При температуре  $t_1$  (рис. VIII.1, а) диффузия протекает в решетке  $\alpha$ , а при температуре  $t_4$  — в решетке  $\gamma$  без фазовых превращений. Следовательно, при температуре насыщения существуют только  $\alpha$ - или  $\gamma$ -твердые растворы, и концентрация диффундирующего элемента постепенно уменьшается от максимальной на поверхности до нуля на некоторой глубине (рис. VIII.1, б). При этом диффузионный слой в микроструктуре можно определить только по несколько большей его травимости.

Насыщение при температурах  $t_2$  и  $t_3$  сопровождается фазовой перекристаллизацией при температуре диффузии. В случае диаграммы состояния с замкнутой областью  $\gamma$ -фазы (Fe—Cr; Fe—Si и др.) диффузия первоначально протекает в  $\gamma$ -фазе, а при достижении на поверхности предела растворимости происходит фазовая перекристаллизация  $\gamma \rightarrow \alpha$ . Зародыши  $\alpha$ -фазы от поверхности растут по направлению диффузии, образуя характерные столбчатые кристаллиты. При насыщении железа элементом, расширяющим область  $\gamma$ -фазы (Fe—Mn; Fe—Ni), диффузия сначала (при температуре  $t_3$ ) протекает в  $\alpha$ -фазе, а при достижении предела растворимости образуется  $\gamma$ -фаза. Перекристаллизация также начинается на поверхности железа и распространяется вглубь с образованием столбчатых кристаллитов. Если при охлаждении происходит перекристаллизация, столбчатые кристаллы могут исчезнуть. На границе раздела двух фаз ( $\alpha$  и  $\gamma$ ) устанавливается перепад концентрации (см. рис. VIII.1, б), а в микроструктуре (после охлаждения) обнаруживается пограничная диффузионная линия. Двухфазные слои ( $\alpha + \gamma$ ) при температуре диффузии образовываться не могут. Они могут возникнуть лишь в результате превращений при охлаждении. При насыщении легированной стали при температуре диффузии могут возникнуть многофазные слои.

При определении глубины диффузионного слоя, полученного при насыщении стали металлами, обычно указывают не полную глубину слоя с измененным составом, а только

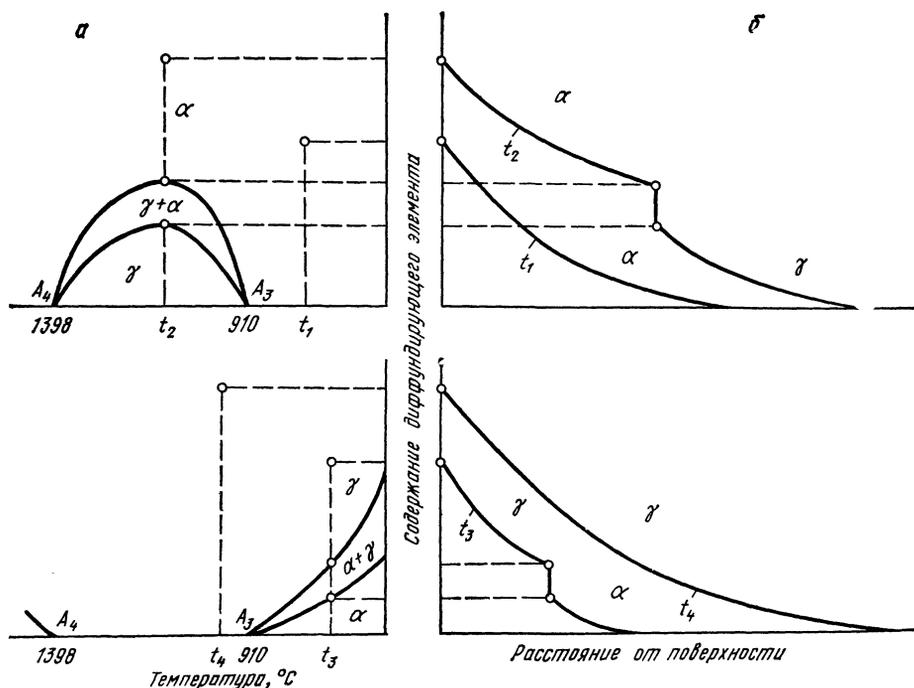


Рис. VIII.1 Схема диаграмм состояния железо—диффундирующий элемент (а) и кривые изменения концентрации диффундирующего элемента по толщине диффузионного слоя (б)

глубину до пограничной диффузионной линии между  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фазами. Это объясняется тем, что трудно металлографически определить полную глубину диффузии и за граничной линией концентрация диффундирующего элемента сравнительно невелика и, следовательно, в этой части слоя не происходит заметного изменения свойств.

В зависимости от применяемой активной среды и насыщающих элементов различают следующие виды химико-термической обработки: цементация (науглероживание), азотирование, высокотемпературная нитроцементация (азотонауглероживание, карбонитрирование), высокотемпературное цианирование (азотонауглероживание), борирование, алитирование (алюминирование), хромирование, силицирование и др.<sup>1</sup>

## 2. Цементация

Цементацией стали называется процесс диффузионного насыщения поверхности стальных изделий углеродом при нагревании в соответствующей среде — карбюризаторе. Применяют цементацию для получения у деталей и инструмента высокой поверхностной твердости, износостойкости и повышенной усталостной прочности. Эти свойства достигаются обогащением поверхностного слоя стали углеродом до эвтектоидной или заэвтектоидной концентрации и последую-

щей термической обработкой, сообщающей поверхностному слою стальных изделий структуру мартенсита или мартенсита с карбидами и небольшим количеством остаточного аустенита.

Как правило, цементации подвергают детали из низкоуглеродистых сталей, у которых после цементации и закалки достигаются высокая твердость поверхности и вязкая сердцевина. Их состав, свойства и назначение приведены выше (см. гл. V).

За техническую глубину цементованного слоя обычно принимают сумму заэвтектоидной, эвтектоидной и половины переходной (доэвтектоидной) зон; иногда принимают глубину до первых участков феррита. При содержании в стали не более 0,17% С глубина цементованного слоя составляет 15% от наименьшей толщины или диаметра цементуемого сечения. При содержании в стали более 0,17% С глубина слоя уменьшается до 5—9%. Для изделий, работающих на износ и не испытывающих больших удельных нагрузок, глубина цементованного слоя составляет 3—4% от наименьшей толщины или диаметра цементуемого изделия. Наиболее часто глубина цементованного слоя составляет 0,5—2,2 мм. Значительно реже детали цементируют на меньшую и большую глубину. Примером деталей, цементуемых на значительную глубину, являются кольца крупногабаритных подшипников качения (глубина цементованного слоя 6—10 мм) и звенья тяговых цепей ковшей шагающих экскаваторов (глубина цементованного слоя 5—8 мм). Глубину цементованного слоя

<sup>1</sup> В скобках даны наименования видов химико-термической обработки, рекомендуемые Институтом по стандартизации СЭВ.

Т а б л и ц а VIII.1

Глубина цементованного слоя зубчатых колес

Модуль, мм	Толщина зуба, мм	Глубина цементованного слоя, мм	Модуль, мм	Толщина зуба, мм	Глубина цементованного слоя, мм
1,25	1,963	0,3—0,5	4,0	6,283	0,8—1,1
1,75	2,749	0,4—0,6	4,25	6,675	0,9—1,1
2,25	3,534	0,65—0,7	4,75	7,462	1,0—1,3
2,5	3,927	0,6—0,8	5,0	7,854	1,1—1,3
3,0	4,712	0,6—0,9	6,0	9,452	1,2—1,5
3,5	5,498	0,7—1,0	7,0	10,995	1,2—1,5
3,75	5,891	0,7—1,0	≥10	≥18	1,3—1,8

Примечание Глубина цементованного слоя относится к готовой шестерне без учета припуска на шлифование, величина которого лежит в пределах 0,05—0,4 мм на сторону.

Т а б л и ц а VIII.2

Составы обмазок, применяемых для защиты поверхности изделий от цементации

Составляющие	Содержание, %	Способ приготовления
Тальк Белая глина Вода	50 25 25	В смесь добавляют жидкое стекло до сметанообразного состояния. При высокой температуре образуется стекловидная пленка, препятствующая проникновению углерода. Применяют при цементации твердым карбюризатором
Одноклористая медь Свинцовый сурик	70 30	Смесь замешивают на канифольном лаке до сметанообразного состояния
Песок Глина Бура Натриевая селитра Окись свинца	41 43 10 3 3	Смесь разводят на жидком стекле и наносят в два слоя. Применяют при газовой цементации
Тальк Окись алюминия Свинцовый сурик	58 28 14	Смесь разводят на жидком стекле (1 часть смеси и 3 части жидкого стекла)
Песок Глинозем Окись железа Окись титана Окись магния	30 35 30 0,25 4,75	Смесь разводят на жидком стекле (3 части смеси и 1 часть жидкого стекла). Пасту наносят в два слоя
Глина Песок Бура Нитрат натрия	40 45 12 3	Смесь разводят на жидком стекле и наносят в один слой
Окись меди Тальк	60 40	Смесь разводят на жидком стекле (1 часть смеси и 1 часть жидкого стекла). Наносят в два слоя
Маршалит Бура Тальк	88 2 10	Смесь разводят на жидком стекле. Применяют при газовой цементации
Глина шамотная Асбестовая мелочь	90 10	Смесь разводят на воде. Применяют для предохранения отверстий при цементации твердым карбюризатором

Примечание. Обмазки наносят в жидком или пастообразном состоянии на поверхность детали, после чего просушивают ее в специальном шкафу при комнатной температуре. Толщина каждого слоя 2—3 мм.

Таблица VIII.3

## Способы цементации стали

Состав насыщающей среды (смеси)	Режим цементации		Глубина слоя, мм	Примечание
	температура, °C	продолжительность, ч		
<i>Цементация в твердом карбюризаторе</i>				
1. Древесный уголь (березовый) 70—76%; $\text{BaCO}_3$ 20—25%; $\text{CaCO}_3$ 3—5% (ГОСТ 2704—77)	930—950	4—15	0,6—1,8	Ящики загружают в печь, нагретую до 700°С либо имеющую рабочую температуру. Охлаждают ящики на воздухе
2. Каменноугольный полукокс 85%; $\text{BaCO}_3$ 12%; $\text{CaCO}_3$ 3% (ГОСТ 5535—76). Зернистость карбюризатора 3—10 мм, влажность не более 5—6%	930—950	4—15	0,6—1,4	То же
<i>Газовая цементация</i>				
1. Смесь эндогаза и городского газа [16—20% CO; 12—16% ( $\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6$ ); 30—40% $\text{H}_2$ ; 20—30% $\text{N}_2$ ]	930—950	6—10	0,6—1,8	Процесс проводят в безмуфельных шахтных и камерных печах
2. Эндогаз+3—5% природного газа (до 98% $\text{CH}_4$ )	930—950	6—10	0,6—1,8	То же
3. Газы, получаемые из керосина, синтина, различных спиртов непосредственно в печи для цементации	930—950	4—10	0,6—1,8	Процесс проводят в шахтных или камерных печах
<i>Жидкостная цементация</i>				
Соляная ванна состава: 78—85% $\text{Na}_2\text{CO}_3$ +10—15% $\text{NaCl}$ +6—8% SiC (карборунда)	880—900	0,5	0,15—0,2	Для мелких деталей. Недостаток — неравномерная глубина слоя. Карборунд добавляют после расплавления солей

зубчатых колес выбирают в зависимости от их модуля и толщины зуба (табл. VIII.1).

Непосредственно перед цементацией детали очищают от ржавчины, грязи, масла и других загрязнений. Иногда цементации подвергают только часть детали. В индивидуальном и мелкосерийном производстве на участке деталей, не подлежащих цементации, оставляют припуск, величина которого в 1,5—2 раза превышает глубину цементованного слоя. В массовом и крупносерийном производстве участки, не подлежащие цементации, защищают электролитически омеднением. Толщина слоя меди, гарантирующая защиту от науглероживания, при глубине цементованного слоя 0,8—1,2 мм должна составить 30—40 мкм, а при глубине более 1,2 мм 50—70 мкм. Медное покрытие должно быть плотным, без пузырей и пористости. Иногда для защиты поверхности изделий от цементации применяют противоцементационные обмазки. Их состав приведен в табл. VIII.2.

Внутренние полости изделий и отверстия обычно защищают от цементации путем за-

бивки смесью кварцевого песка и окалины (в соотношении 1 : 1) или смесью шамотного порошка и окалины (в соотношении 1 : 2). Смесью плотно утрамбовывают, а концы отверстий тщательно забивают асбестовыми пробками.

Как правило, цементацию проводят при температуре выше точки  $A_{c3}$  (930—980°С), когда устойчив аустенит, растворяющий углерод в больших количествах.

На практике применяют в основном три вида цементации: в твердом карбюризаторе, газовую и в жидком карбюризаторе. Их технологические особенности представлены в табл. VIII.3.

**Цементация в твердом карбюризаторе**

Для осуществления цементации в твердом карбюризаторе детали обезжиривают и укладывают в цементационные ящики. Ящики могут иметь различные размеры и форму (круглую, квадратную, с внутренним отверстием и др.). Их изготавливают из стали, чугуна и жароупорных сплавов. Стойкость

Таблица VIII.4

## Составы твердых карбюризаторов

Составляющие	Содержание, %	Составляющие	Содержание, %
1. Углекислый барий . . . . .	20—25	3. Углекислый натрий . . . . .	10
Углекислый кальций . . . . .	3,5—5,0	Древесный уголь . . . . .	90
Летучие вещества . . . . .	≤10	4. Углекислый барий . . . . .	10
Вода . . . . .	≤5	Древесный уголь . . . . .	90
Древесный уголь . . . . .	Остальное	5. Углекислый натрий . . . . .	6—10
2. Углекислый барий . . . . .	10—15	Торфяной кокс . . . . .	90—94
Углекислый кальций . . . . .	3,5	6. Древесный уголь . . . . .	40
Вода . . . . .	≤6	Костяная мука . . . . .	60
Полукокс . . . . .	Остальное	7. Углекислый натрий . . . . .	5—8
		Древесные опилки . . . . .	92—95

сварных ящиков составляет 150—200 ч, литых (стальных и чугуновых) 250—300 ч, из жароупорных сплавов 4000—6000 ч. Стойкость стальных цементационных ящиков можно повысить алитированием. Наиболее целесообразно для цементации использовать готовый карбюризатор, поставляемый по ГОСТ 2407—73, ГОСТ 2704—77 и ГОСТ 5535—76. Кроме этих карбюризаторов можно применять и другие типы (табл. VIII.4). Карбюризаторы должны быть экономичными, сообщать углероду достаточную скорость проникновения в сталь, обладать малой плотностью и минимальной усадкой, высокой теплопроводностью, сохранять активность при многократном применении, не иметь вредных примесей и т. д. Во время цементации карбюризатор истощается, поэтому при цементации каждой новой партии изделий его составляют из 50—80% отработанного, предварительно просеянного карбюризатора и 50—20% свежего. Смесь свежего и отработанного карбюризатора необходимо тщательно перемешать.

Изделия следует упаковывать в ящики следующим образом. На дно ящика засыпают слой карбюризатора толщиной 30—40 мм и утрамбовывают его. Затем укладывают изделие, соблюдая расстояние между ними и от стенок ящика в 20—25 мм, вновь насыпают слой карбюризатора толщиной 20—25 мм и утрамбовывают его. Так поступают до тех пор, пока все изделия не будут упакованы. Верхний ряд изделий следует покрыть слоем карбюризатора, утрамбовать и наложить лист асбеста. Затем ящик закрывают крышкой и обмазывают смесью огнеупорной глины с песком. В отверстие в крышке вставляют стержень, изготовленный из того же материала, что и цементируемое изделие (свидетель). После естественной сушки ящики загружают в печь и нагревают до температуры цементации (920—980° С).

В процессе выдержки при температуре цементации внутри ящика происходит окисление углерода, содержащегося в карбюризаторе, кислородом воздуха. В связи с недостатком кислорода в герметизированном ящике процесс идет с образованием окиси углерода:  $2C + O_2 \rightarrow 2CO$ . Однако при высоких температурах окись углерода неустой-

чива; при контакте с поверхностью детали она разлагается на углекислый газ и атомарный углерод:  $2CO \rightarrow CO_2 + C$ . Углерод адсорбируется поверхностью металла, находящегося при температуре процесса в аустенитном состоянии. Проникновение углерода

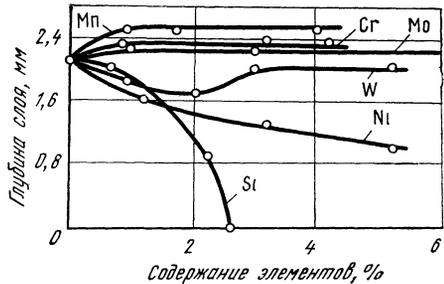


Рис VIII.2 Зависимость глубины цементованного слоя от содержания легирующих элементов

в более глубокие слои осуществляется путем диффузии. Глубина цементованного слоя примерно пропорциональна продолжительности выдержки. Средняя скорость цементации в твердом карбюризаторе 0,08—0,1 мм/ч.

Чем выше температура, тем быстрее протекает процесс цементации и тем глубже проникает углерод. Однако чрезмерно высокие температуры (выше 950° С) приводят к значительному росту зерна. При определенных составах карбюризатора и несоблюдении режима охлаждения в поверхностном слое образуется грубая цементитная сетка. Применение сталей, содержащих титан и ванадий, позволяет повысить температуру цементации до 980° С. Однако при этом создается опасность коробления деталей.

Разборку ящиков после цементации осуществляют при температуре не выше 100° С. Охлажденные детали после цементации должны иметь светло-серую поверхность.

Влияние легирующих элементов на глубину цементованного слоя показано на рис. VIII.2, а влияние температуры — на рис. VIII.3.

К недостаткам цементации в твердом карбюризаторе можно отнести непрямизвод-

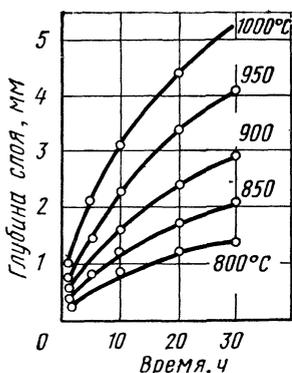


Рис. VIII 3 Влияние температуры на глубину цементованного слоя при различной продолжительности процесса

Таблица VIII.5  
Глубина цементованного слоя при газовой цементации

Продолжительность выдержки, ч	Глубина цементованного слоя, мм, при температуре, °С							
	820	850	875	900	925	950	975	1000
1	0,30	0,38	0,45	0,53	0,63	0,75	0,85	1,00
2	0,42	0,53	0,63	0,76	0,90	1,00	1,22	1,42
3	0,53	0,63	0,80	0,94	1,10	1,30	1,50	1,70
4	0,60	0,74	0,89	1,07	1,27	1,50	1,75	2,00
5	0,70	0,80	0,99	1,20	1,42	1,68	1,96	2,25
6	0,76	0,91	1,09	1,32	1,55	1,83	2,13	2,46
7	0,78	1,00	1,19	1,42	1,68	1,98	2,30	2,55
8	0,86	1,04	1,27	1,52	1,80	2,10	2,46	2,80
9	0,90	1,12	1,35	1,60	1,90	2,23	2,55	3,00
10	0,96	1,17	1,42	1,70	2,00	2,36	2,80	3,20
11	1,02	1,22	1,50	1,78	2,11	2,46	2,80	3,35
12	1,04	1,30	1,55	1,85	2,21	2,50	3,05	3,55
13	1,09	1,35	1,62	1,93	2,29	2,54	3,06	3,56
14	1,14	1,40	1,68	2,00	2,39	2,80	3,30	3,80
15	1,20	1,45	1,73	2,10	2,47	2,80	3,38	3,92
16	1,22	1,50	1,80	2,13	2,54	2,85	3,50	4,05
17	1,27	1,52	1,85	2,20	2,55	3,05	3,55	4,17
18	1,30	1,57	1,90	2,29	2,69	3,17	3,72	4,32
19	1,35	1,62	1,96	2,34	2,70	3,30	3,81	4,40
20	1,37	1,68	2,00	2,39	2,80	3,31	3,89	4,55
21	1,40	1,70	2,06	2,46	2,90	3,41	3,98	4,62
22	1,42	1,75	2,10	2,51	2,96	3,50	4,06	4,73
23	1,47	1,77	2,15	2,54	3,05	3,55	4,17	4,83
24	1,50	1,83	2,20	2,62	3,10	3,65	4,29	5,00
25	1,52	1,85	2,23	2,66	3,16	3,70	4,33	5,10

Примечание. Продолжительность выдержки отсчитывается с момента достижения цементуемыми изделиями заданной температуры.

тельную затрату энергии на прогрев карбюратора и ящиков; длительность процесса и сложность его регулирования; невозможность непосредственной закалки после цементации и др. Однако универсальность и простота этого метода обуславливают широкое применение цементации в твердом карбюраторе при мелкосерийном производстве (например, на ремонтных предприятиях). При массовом производстве чаще применяют газовую цементацию.

### Газовая цементация

При газовой цементации изделия нагревают в газовой атмосфере, содержащей  $\text{CN}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ . Науглероживание стали происходит в основном из-за реакции распада окиси углерода и метана при температуре цементации. Применение газовой

Таблица VIII.6

Средние значения скорости газовой цементации при различной температуре

Глубина слоя, мм	Скорость цементации, мм/ч, при температуре, °С				
	900	925	950	975	1000
≤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

цементации уменьшает длительность процесса для получения заданной глубины слоя, позволяет механизировать и автоматизировать процесс и упростить последующую термическую обработку. При газовой цементации можно автоматически регулировать состав цементующей газовой среды для обеспечения заданной концентрации углерода на поверхности цементованного слоя.

Влияние температуры и продолжительности выдержки на глубину цементованного слоя при газовой цементации показано в табл. VIII.5, а скорость газовой цементации при различных температурах — в табл. VIII.6.

Газовую цементацию обычно проводят в шахтных (муфельных и безмуфельных) и методических (безмуфельных) печах; иногда применяют специальные агрегаты. Техническая характеристика ряда печей, применяемых для газовой цементации, представлена в табл. VIII.7 и VIII.8.

#### Другие способы цементации

В редких случаях, в основном для мелких деталей, применяют цементацию в жидкой ванне. Ее осуществляют в ваннах, техническая характеристика которых представлена в табл. VIII.9.

Иногда, при индивидуальном производстве, цементацию производят при помощи специальных паст путем обмазки ими участков, подлежащих цементации. В табл. VIII.10 приведены составы этих паст.

Все составляющие части паст необходимо превратить в порошок, затем перемешать и развести разжижителями. Для получения цементованного слоя глубиной 1—1,5 мм на поверхность изделия кистью наносят слой пасты толщиной 3—4 мм; слой пасты можно наносить и окунанием детали. После затвердевания пасты изделия упаковывают в ящики и закрывают крышками; зазоры обмазывают смесью огнеупорной глины с песком. Процесс цементации осуществляют при температуре 930—950°С в течение 2—4 ч.

Виды брака при цементации и способы его устранения указаны в табл. VIII.11.

#### Термическая обработка цементованных изделий

Окончательные свойства цементованные изделия приобретают в результате термической обработки, выполняемой после цементации. Эта обработка необходима для исправления структуры, а нередко и измельчения зерна сердцевин и цементованного слоя; получения высокой твердости цементованного слоя и хороших механических свойств сердцевины; устранения в цементованном слое карбидной сетки, возникающей при пересыщении его углеродом. В результате термической обработки (различные варианты закалки и низкий отпуск при 160—180°С в течение 1—2 ч) поверхностный слой приобретает структуру мартенсита или мартенсита с небольшим количеством избыточных карбидов в виде глобулей. Твердость слоя для углеродистой стали HRC 60—64 и для легированной стали HRC56—61. Снижение твердости поверхности в легированных сталях связано с повышенным количеством остаточного аустенита. Структура сердцевины зависит от состава обрабатываемой стали и режима закалки. Сердцевина деталей из углеродистой стали состоит из феррита и перлита, а деталей из легированных сталей — из феррита и мартенсита (при закалке с температур ниже  $A_{c3}$  стали сердцевины изделий) или из малоуглеродистого мартенсита (при закалке с температуры выше  $A_{c3}$ ). Низкоуглеродистый мартенсит обеспечивает высокую прочность и достаточную вязкость сердцевины. Твердость сердцевины из углеродистых сталей HRC20—25, а из легированных HRC25—40.

В зависимости от назначения деталей и требований, предъявляемых к поверхностному слою, применяют ряд способов термической обработки деталей после цементации (табл. VIII.12).

Основными из них являются:

1. Закалка с цементационного нагрева. Применяется для ответственных деталей, основное требование к которым — высокая

Таблица VIII.7

Техническая характеристика шахтных электропечей для газовой цементации

Тип	Мощность, кВт	Температура, °С	Размер рабочего пространства (диаметр, высота), мм	Габаритные размеры (ширина×длина×высота), мм	Масса садки, кг	Завод-изготовитель
СШЦМ-6.6/9М1	73,2	900	600×600	2600×2650×3060	400	«Электропечь» (г. Бийск)
СШЦМ-6.12/9М1	88,2	900	600×1200	2600×2650×3720	800	То же
СШЦМ-6.20/9М1	103,2	900	600×2000	2600×2650×4380	900	»
СШЦМ-6.30/9М1	133,2	900	600×3000	2600×2650×5700	1200	»
ОКБ-827А	230	950	2400×1700	7275×7275×4845	4000	«Азерэлектротерм» (г. Баку)
Ц-60А	60	950	450×600	2600×2005×2616	320	«Электропечь» (г. Бийск)
Ц-105А	105	950	600×1200	2900×2216×3485	1100	То же
СШЦМ-25.20/9,5И1	380,5	950	2500×2000	7610×8190×5615	5000	—

Примечание. Расшифровка обозначения печей типа СШЦМ производится следующим образом: С — нагрев сопротивлением; Ш — шахтная электропечь; Ц — цементационная; М — муфельная; цифры в числителе — размеры рабочего пространства (диаметр, высота), мм; цифры в знаменателе — рабочая температура, в сотнях °С; буква и цифра в знаменателе — исполнение и шифр организации-разработчика.

Таблица VIII.8

Техническая характеристика камерных агрегатов с защитной атмосферой

Тип	Назначение	Мощность, кВт	Температура, °С	Размер рабочего пространства основной печи (ширина×длина×высота), мм	Габаритные размеры агрегата (ширина×длина×высота), мм	Производительность, кг/ч	Завод-изготовитель
СНЦА-5.10.5/3С1	Цементация, закалка, низкий отпуск	505	950/350	500×1000×500	6700×15 250×3780	400	ЗЭТО (г. Саратов)
СНЦА-5.10.5/3,5ИЗ	То же	485	950/350	500×1000×500	6700×15 250×3890	400	«Индуктор» (г. Новозыбково)
СНЦА-5.10.5/7,5И2	Цементация, закалка, высокий отпуск	491	950/750	500×1000×500	6700×14 000×3800	200	То же

Тип	Назначение	Мощность, кВт	Температура, °С	Размер рабочего пространства основной печи (ширина×длина×высота), мм	Габаритные размеры агрегата (ширина×длина×высота), мм	Производительность, кг/ч	Завод-изготовитель
СНЦА-8.12,5,6/3,5И1	Цементация, закалка, низкий отпуск	693	950/350	800×1250×600	7475×17 050×4215	—	»
СНЦА-8.12,5,6/7,5И1	Цементация, закалка, высокий отпуск	685	950/750	800×1250×600	7475×17 050×4215	—	»

Примечание. Расшифровка обозначений типов агрегата производится следующим образом: С — нагрев сопротивлением; Н — камерный; Ц — атмосфера печи цементационная; А — агрегат; цифры в числителе — размеры рабочего пространства первой печи (ширина, длина, высота), мм; цифра в знаменателе — рабочая температура, в сотнях °С; буква и цифра в знаменателе — исполнение и шифр организации-разработчика.

Таблица VIII.9  
Техническая характеристика электровани

Тип	Назначение	Мощность, кВт	Температура, °С	Размер рабочего пространства (ширина×длина×высота), мм	Габаритные размеры (ширина×длина×высота), мм	Емкость, л	Производительность, кг/ч
СВС-3,5.8.4/6,5М-М1	Цианирование, диффузионная металлизация	60	650	350×800×400	1910×1770×1400	290	200
СВС-1,5.3.4/8,5М-М1	Цементация, цианирование, диффузионная металлизация	35	850	150×300×400	1325×1010×1340	88	110
СВС-3,5.8.4/8,5М-М01	То же	100	850	350×800×400	1910×1770×1400	—	270
СВС-7,6/10И1	Электролизное борирование	138,4	1000	∅700×600	1650×3620	360	Садка 100 кг

Примечание. Расшифровка обозначений типа вани производится следующим образом: С — нагрев сопротивлением; В — ванна; С — расплавленные соли и щелочи для электродных ванн; цифры в числителе — размеры рабочего пространства (ширина, длина, высота), мм; цифры в знаменателе — рабочая температура, в сотнях °С; буква и цифры в знаменателе — исполнение и шифр организации-разработчика.

Т а б л и ц а VIII.10

Составы паст для цементации

Компоненты	Содержание, %			Компоненты	Содержание, %		
	I	II	III		I	II	III
Газовая сажа . . . . .	28	—	—	Веретенное масло . . .	67	40	—
Голландская сажа . . .	—	30	55	Декстрин . . . . .	—	20	—
Кальцинированная сода . . . . .	3,5	10	30	Щавелевокислый натрий . . . . .	—	—	15
Желтая кровяная соль . . . . .	1,5	—	—				

Т а б л и ц а VIII.11

Виды брака при цементации и способы их устранения

Вид брака	Причины возникновения	Способы устранения
Чрезмерно большая глубина цементованного слоя	Завышенная продолжительность выдержки при цементации; применение активного карбюризатора; высокая температура цементации; неравномерная температура в печи	Устранить причины, вызывающие брак; при завышенной глубине цементации брак не исправим
Заниженная глубина цементованного слоя	Недостаточная продолжительность выдержки при цементации; заниженная температура цементации; применение слабого карбюризатора; неравномерная температура в печи	Соблюдение технологического процесса
Повышенная концентрация углерода в цементованном слое	Применение сильного карбюризатора; завышенная продолжительность выдержки при цементации	То же
Пониженная концентрация углерода в цементованном слое	Применение слабого карбюризатора	Тщательная дозировка цементующих веществ
Неравномерная глубина цементованного слоя	За жиренная и грязная поверхность изделия; неправильная упаковка цементационных ящиков; отложение сажи при газовой цементации	Очистка поверхности изделий перед цементацией; тщательное замазывание цементационных ящиков и утрамбовка карбюризатора; тщательная дозировка цементующих веществ
Отслаивание закаленного цементованного слоя	Резкий переход цементованного слоя к сердцевине; наличие цементитной сетки	Уменьшение процента свежего карбюризатора
Хрупкость (выкрашивание) поверхностного слоя	Применение активного карбюризатора; завышенная продолжительность выдержки	Снижение активности карбюризатора, соблюдение технологического процесса
Стекловидные наплывы на поверхности изделий	Наличие кварцевого песка в карбюризаторе	Не допускать попадания кварцевого песка в карбюризатор

поверхностная твердость. В связи со значительным ростом зерна аустенита при цементационном нагреве после закалки образуется крупноиглочатый мартенсит, а сердцевина имеет грубую крупнозернистую структуру. Механические свойства после закалки весьма низкие. В структуре закаленной стали содержится повышенное количество остаточного аустенита, снижающего твердость цементованного слоя. Преимущества закалки с цементационного нагрева — низкая

стоимость и незначительные деформации детали, что связано с отсутствием повторных нагревов.

Следует отметить, что в ряде случаев этот способ закалки удается применить и для ответственных деталей. Для этого используют газовую цементацию (вместо цементации в твердом карбюризаторе), следовательно мелкозернистые стали и обработку холодом (для снижения количества остаточного аустенита).

Т а б л и ц а VIII.12

## Режимы термической обработки цементованных деталей

Режим термической обработки <sup>1</sup>	Влияние термической обработки на структуру и твердость стали	Применение термической обработки
1	2	3
1. Непосредственная закалка с температуры цементации (из печи или ящика)	Не измельчается зерно, наблюдается значительное коробление деталей. У легированных сталей — пониженная твердость поверхности из-за сохранения в слое остаточного аустенита	Наиболее простой и дешевый способ, применяется редко, лишь для наименее ответственных деталей
2. Непосредственная закалка с подстуживанием до 800—850°С (до температуры несколько выше $A_{c3}$ сердцевины)	Подстуживание способствует уменьшению коробления деталей и повышению твердости поверхности за счет уменьшения количества остаточного аустенита. Зерно стали при такой обработке не измельчается	Широко применяется для ответственных деталей, изготовленных из наследственно мелкозернистых сталей и подвергнутых газовой цементации
3. Непосредственная ступенчатая закалка с предварительным подстуживанием	То же, что и в п. 2. Ступенчатая закалка позволяет добиться минимального коробления деталей, но способствует увеличению количества остаточного аустенита в слое	Применяется в тех случаях, когда необходимо минимальное коробление деталей <sup>2</sup>
4. Непосредственная закалка с подстуживанием до 800—850°С, затем обработка холодом до —75°С <sup>3</sup>	Повышается поверхностная твердость за счет превращения при обработке холодом остаточного аустенита в мартенсит	Применяется редко, лишь для высоколегированных сталей
5. Охлаждение после цементации с любой скоростью, а затем одинарная закалка с 760—780°С или с температуры выше $A_{c3}$ сердцевины	При более быстром охлаждении после цементации не образуется цементитная сетка, но увеличивается коробление деталей. Закалкой достигается измельчение зерна. При закалке с 760—780°С сердцевина закаливается неполностью. Для высоконагруженных деталей применяют закалку с температуры выше $A_{c3}$ сердцевины	Применяется часто после цементации в твердом карбюризаторе и реже после газовой цементации
6. То же, что и в п. 5, но закалка ступенчатая	То же, что и в п. 5, но уменьшается коробление	Применяется редко
7. То же, что и в п. 5, но перед одинарной закалкой высокий отпуск (смягчающий отжиг) при 620—650°С в течение 3—10 ч <sup>4</sup>	После высокого отпуска облегчается обработка резанием. Выделяющиеся карбиды полностью успевают раствориться в аустените при нагреве под закалку, что приводит к уменьшению количества остаточного аустенита в цементованном слое	Применяется в основном после цементации в твердом карбюризаторе, реже — после газовой цементации
8. Охлаждение после цементации на воздухе (или вместе с ящиком), затем двойная закалка или нормализация и закалка	При первой закалке (или нормализации) с 880—900°С устраняется цементитная сетка и измельчается зерно сердцевины. Нормализация предпочтительней с точки зрения снижения коробления. При второй закалке (с 760—800°С) измельчается зерно цементованного слоя	Применяется редко, главным образом после цементации в твердом карбюризаторе ответственных деталей
9. Двойная закалка с промежуточным высоким отпуском при 650°С	Цель двойной закалки та же, что и в п. 8. Назначение высокого отпуска то же, что и в п. 7	То же

1	2	3
10. Охлаждение после цементации на воздухе или в ящике; затем поверхностная закалка с нагрева токами высокой частоты	Измельчается зерно цементованного слоя и переходной зоны, нагретых токами высокой частоты выше критических точек	Применяется после цементации в твердом карбюризаторе и газовой цементации
11. Газовая цементация при 1050°С с нагревом токами высокой частоты, подстуживание до 820—850°С и закалка	Цементуемые детали изготавливают из наследственно мелкозернистых сталей, поэтому их свойства под влиянием высокой температуры цементации не снижаются	Применяется для термической обработки зубчатых колес из сталей 18ХГТ и 30ХГТ
12. После высокого отпуска нагретую деталь сразу же переносят в печь для дальнейшего нагрева под закалку; закалку производят в горячей среде	Достигается минимальное коробление за счет применения ступенчатой закалки и совмещения нагревов	Применяется после цементации в твердом карбюризаторе и газовой цементации низколегированных сталей. Достигается сокращение цикла обработки

\*1 При всех вариантах обработки заключительной операцией является низкий отпуск при 160—200°С в течение 1—2 ч для уменьшения напряжений и некоторого повышения вязкости стали. Поверхностная твердость цементованной стали после закалки и низкого отпуска должна быть не менее HRC60.

\*2 Для уменьшения коробления сложных и склонных к короблению деталей (например, зубчатых колес) закалку часто проводят в штампах. Такую закалку применяют и при других вариантах обработки цементованных деталей.

\*3 Обработку деталей холодом следует выполнять непосредственно после закалки, так как предварительный низкий отпуск или вылеживание при комнатной температуре стабилизируют аустенит. Обработка холодом может быть включена и в другие варианты обработки (например, пп. 3, 5, 6, 7).

\*4 Высокий отпуск сталей 18Х2Н4ВА и 12Х2Н4МА по указанному режиму не всегда обеспечивает необходимое снижение их твердости даже при большой продолжительности этой операции (24—30 ч). Для того чтобы сократить ее, следует устранить пересыщение цементованного слоя углеродом (применяя малоактивный карбюризатор) и проводить двукратный высокий отпуск при 650°С продолжительностью 8 ч каждый с последующим медленным охлаждением

2. Охлаждение после цементации на воздухе и нагрев под закалку до температур 850—900°С. При этом обеспечивается полная перекристаллизация как сердцевины, так и науглероженного поверхностного слоя, так как нагрев производят выше критических точек  $A_{c3}$  для данных марок стали. В связи с этим растворится цементитная сетка по границам зерен и образующаяся в результате закалки структура значительно более мелкозерниста и однородна, чем при закалке с цементационного нагрева. Соответственно выше и механические свойства.

3. Охлаждение после цементации на воздухе и двойная закалка. Первую закалку от температур 850—900°С применяют для измельчения структуры сердцевины и устранения цементитной сетки на поверхности. В связи с тем что эту закалку проводят только для перекристаллизации, в ряде случаев ее удается заменить нормализацией. Вторую закалку проводят от температур 760—800°С. В результате на поверхности образуется мелкоигльчатый мартенсит с вкраплениями цементита, а в сердцевине — мелкозернистая феррито-перлитная структура. У легированной стали при полной закалке сердцевины образуется мартенситная структура, при неполной — мартенсит + феррит, однако в обоих случаях в связи с низ-

ким содержанием углерода в мартенсите сердцевина будет достаточно вязкой. В результате такой термической обработки обеспечиваются высокие механические свойства стали на поверхности и в сердцевине детали. Однако в связи с высокой стоимостью двойной закалки ее применяют только при термической обработке ответственных деталей.

#### Цементация деталей металлургического оборудования

Приведем ряд примеров, иллюстрирующих эффективность применения цементации деталей машин.

На одном из металлургических заводов чистовые проводки скольжения для станков 260 и 330 изготавливают из стали 20Х. Для цементации их загружают в металлический короб, заполненный карбюризатором (90% древесного угля и 10% кальцинированной соды). Затем короб герметически закрывают крышкой, обмазывают огнеупорной глиной и помещают в печь. Нагрев до температуры, при которой происходит цементация (920—940°С), длится 4 ч. В результате длительной выдержки при этой температуре углерод диффундирует в поверхностный слой изделия, образуя слой эвтектидного состава определенной глубины (в за-

висимости от длительности выдержки). Для проводок стана 260 выдержка при температуре цементации составляет 12—14 ч, что обеспечивает глубину проникновения углерода в поверхность детали 1,2—1,5 мм; для проводок стана 330 продолжительность выдержки составляет 15—18 ч. Это время обеспечивает глубину цементации 1,5—1,8 мм. После цементации короба с проводками охлаждают на воздухе. Для исправления зерна сердцевины цементованные проводки нагревают в печи до 880—900°С, выдерживают при этой температуре в течение 1 ч и охлаждают на воздухе. Затем проводят закалку в воде с температуры 760—780°С. Твердость рабочей канавки после закалки должна составлять не менее HRC60—62. Напряжения, возникшие в проводках при закалке, снимают отпуском при температуре 160—180°С. Твердость рабочей канавки после отпуска должна быть не ниже HRC60.

Заключительной операцией является хромирование в ванне, содержащей раствор следующего состава: хромовый ангидрид 240 г на 1 дм<sup>3</sup> дистиллированной воды; серная кислота 2 г на 1 дм<sup>3</sup> дистиллированной воды. Температура ванны 50°С, напряжение 8—10 В, плотность тока 50 А/дм<sup>2</sup>. В результате выдержки проводок в ванне в течение 30 мин получается хромовое покрытие толщиной 0,03—0,05 мм. После хромирования рабочую канавку полируют на фетровом круге. Такая технология изготовления проводок обеспечивает их стойкость, достигающую 10 смен и более.

Длительным сроком службы отличаются цементованные цилиндрические и конические шестерни. Чаще всего их изготавливают из легированных цементуемых сталей 20Х, 12ХН3А, 20ХН3А, 18ХГТ и др. Углеродистые цементуемые стали применяют реже, так как материал их сердцевин, расположенной непосредственно под твердым цементованным слоем, плохо сопротивляется касательным напряжениям при срезе и напряжениям изгиба, вследствие чего во время работы часто происходит продавливание и растрескивание цементованного слоя. Сердцевина зубьев шестерен из легированных цементуемых сталей обладает большей прочностью, поэтому легированные стали следует применять для изготовления шестерен более ответственных зубчатых передач.

На металлургических предприятиях (ММК, КМК, НТМК, им. Дзержинского, им. Кирова, Череповецком и др.) успешно проводят цементацию мелко- и крупномодульных шестерен, пальцев, втулок и роликов шлепперов, пальцев, звеньев и втулок пластинчатых цепей и т. д. В качестве примера в табл. VIII.13 приведены данные по технологии цементации ряда деталей металлургического оборудования.

При цементации значительно повышается срок службы деталей. Шестеренные валы электродвигателей и зубчатые ободы (венцы) роликов с индивидуальным приводом рольганга стана 500, которые ранее изготавливали из стали 35, ежемесячно выходили из строя. Применение для их изготовления хромоникельмолибденовой стали с цемента-

цией этих деталей позволило повысить срок службы до 6 мес.

Шестерни редукторов бурильных машин, изготовленные из стали 45, имели недостаточный срок службы главным образом из-за поломки зубьев. С применением цементации шестерен, изготовленных из стали 20ХН3А, поломки прекратились. Шестерни коробки передач привода дискового грохота, изготовленные из стали 35, работали 3—6 мес; применение стали 20ХН3А с цементацией позволило увеличить срок их службы до 3—5 лет. Конические шестерни ( $m=6$  мм,  $z=42$  и  $z=46$ ) дифференциального редуктора привода летучих ножиц цеха холодной прокатки изготавливали из стали 20Х. Поломки зубьев происходили через 15—20 сут. После применения стали 18Х2Н4МА с цементацией поломки зубьев прекратились; срок службы шестерен увеличился до 8 мес.

В ремонтном хозяйстве различных заводов целесообразно применение цементации кислородно-ацетиленовым пламенем. При этом отмечается высокая производительность: за 30 мин цементации при 1100°С диффузионный слой достигает 0,8—1 мм, в то время как при обычной цементации этот слой получается за 8—10 ч. Наблюдаемый при этом методе интенсивный рост зерна аустенита можно легко устранить последующей нормализацией либо применением nasledственно мелкозернистых сталей.

### 3. Азотирование

Азотированием стали называется процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стальных изделий азотом при нагревании их в среде, содержащей аммиак. Азотирование производят для повышения поверхностной твердости и износостойкости изделий или защиты их поверхностей от коррозии. В связи с тем что при азотировании на поверхности возникают остаточные напряжения сжатия, повышается усталостная прочность деталей. Твердость азотированного слоя значительно выше, чем твердость цементованной стали, и сохраняется при нагреве до высоких температур, тогда как твердость цементованного слоя, имеющего мартенситную структуру, сохраняется только до 200—220°С.

#### Строение азотированного слоя

При азотировании стали образуются следующие фазы:  $\alpha$ -фаза — твердый раствор азота в  $\alpha$ -железе;  $\gamma'$ -фаза — твердый раствор на основе нитрида железа  $Fe_4N$  (5,7—6,1% N);  $\epsilon$ -фаза — твердый раствор на основе нитрида железа  $Fe_3N$  (8—11,2% N). При температуре выше 591°С существует  $\gamma$ -фаза, которая представляет собой твердый раствор азота в  $\gamma$ -железе. При температуре 591°С  $\gamma$ -фаза претерпевает эвтектидный распад. Азотистый эвтектонд содержит 2,35% N и состоит из  $\alpha$ - и  $\gamma'$ -фаз.

Азотирование проводят в атмосфере аммиака, который при нагреве диссоциирует по схеме  $2NH_3 \rightarrow 2N + 6H$ . Степень диссоциа-

Таблица VIII.13

Режимы термической обработки некоторых деталей металлургических машин, изготовленных из цементуемых сталей (по данным металлургических предприятий)

Наименование детали, механизма, машины	Марка стали	Предварительная термическая обработка (нормализация) при температуре, °С	Цементация*		Термическая обработка после цементации	Твердость	
			продолжительность, ч	глубина заоя, мм		поверхности HRC	среднюю HB
Ось ролика конвейера разливочной машины	20	900—920	16—18	2—2,5	Нормализация при 880—900°С, закалка в воде с температуры 780—800°С, отпуск при 160—180°С	54—58	138—158
Ось ходового колеса разливочного крана грузоподъемностью 270/45/15 т; ось обоймы механизма подъема груза мостового крана грузоподъемностью 30 т; ось паразитной шестерни рольганга	20	900—920	14—18	1,5—2,0	Охлаждение в цементационном ящике на воздухе до температуры окружающей среды, закалка в воде с температуры 760—780°С, отпуск при 180—200°С	56—61	145—160
Валик и щека звена цепи холодильника универсального стана	20X	880—900	3—4	0,4—0,6	Охлаждение в цементационном ящике на воздухе до температуры окружающей среды, нормализация при 870—890°С, закалка в воде с температуры 780—800°С, отпуск при 180—200°С	58—61	197—235
Шестерня ( $m=6$ мм) привода легучих ножниц	20X	880—900	6—8	0,8—1,0	Подстуживание на воздухе до 860°С, закалка с цементационного нагрева в масле, закалка в масле с температуры 780—800°С, отпуск при 200—220°С	58—60	197—235
Шестерня ( $m=10$ мм) ролика подъемного стола прокатного стана	20X	880—900	14—16	1,6—1,8	Подстуживание на воздухе до 850—870°С, закалка в масле с температуры 780—800°С, отпуск при 180—200°С	58—61	197—235
Муфта соединительного шпинделя привода 13-валковой правильной машины	20X	880—900	6—8	0,8—1,0	Охлаждение в цементационном ящике на воздухе до температуры окружающей среды, закалка в масле с температуры 800—820°С, отпуск при 180—200°С	58—61	197—235

Шестерня ( $m=18$ мм) трансмиссии рольганга прокатного стана	20X	900—920	10—12	1,2—1,4	Охлаждение в цементационном ящике на воздухе до температуры окружающей среды, нормализация при 870—890° С, закалка в масле с температуры 780—800° С, отпуск при 180—200° С	56—61	217—255
Шестерня ( $m=16$ мм) трансмиссии рольганга прокатного стана	20X	880—900	10—12	1,2—1,4	Охлаждение в цементационном ящике до 800—820° С, закалка с цементационного нагрева в масле, отпуск при 180—200° С	58—60	283—298
Шестерня ( $m=10$ мм) редуктора распределителя шихты доменной печи	20XH	860—880	14—16	1,6—1,8	Подстуживание на воздухе до 860° С, закалка с цементационного нагрева в масле, закалка в масле при нагреве до 760—780° С, отпуск при 180—200° С	58—61	262—290
Шестерня ( $m=6$ мм) ступенчатых роликов рабочего рольганга блюминга 1100	20XH	860—880	18—20	2—2,5	Охлаждение в цементационном ящике на воздухе до температуры окружающей среды, нормализация при 870—890° С, закалка в масле с температуры 780—800° С, отпуск при 180—200° С	58—61	262—290
Шестерня ( $m=11$ мм) редуктора разливочной машины	20XH	860—880	14—16	1,6—1,8	То же	58—61	262—290
Шестерня ( $m=10$ мм) редуктора механизма выталкивателя винтовой электропущки	20XH3A	870—900	8—10	1—1,2	Охлаждение в цементационном ящике на воздухе до температуры окружающей среды, нормализация при 860—880° С, закалка в масле с температуры 780—800° С, отпуск при 200—220° С	56—61	383—398
Шестерня ( $m=9$ мм) механизма передвижения вагон-весов	20XH3A	870—900	8—10	1—1,2	Подстуживание на воздухе до 860° С, закалка с цементационного нагрева в масле, закалка в масле с температуры 780—800° С, отпуск при 180—200° С	56—61	383—398
Шестерня ( $m=4$ мм) привода бура бурильной машины	20XH3A	870—900	3—5	0,4—0,6	То же	56—61	383—398

\* Температура цементации 900—920° С.

ции аммиака при 500—520°С составляет 15—25%, при 600—650°С 40—60%. Образовавшийся атомарный азот диффундирует в железо. Если азотирование выполняют при температуре ниже эвтектидной (ниже 591°С), то фазы в диффузионном слое при комнатной температуре (после медленного охлаждения с температуры азотирования) располагаются от поверхности к сердцевине в следующей последовательности:  $\epsilon + \gamma' \rightarrow \gamma' \rightarrow \alpha + \gamma' \rightarrow \alpha$  —сердцевина (с исходной структурой). При азотировании при температуре выше 591°С расположение фаз в азотированном слое соответствует следующей схеме:  $\epsilon + \gamma' \rightarrow \gamma' \rightarrow \alpha + \gamma'$  (эвтектонд)  $\rightarrow \alpha + \gamma'$  (вторичная)  $\rightarrow \alpha$  —сердцевина (с исходной структурой). При переходе от одной фазы к другой в азотированном слое устанавливается резкий перепад концентраций; он устанавливается при температуре диффузии и сохраняется после охлаждения.

### Технология азотирования

Азотированию можно подвергать любые стали. В тех случаях, когда целью азотирования является получение высокой твердости и износостойкости деталей, применяют сталь 38Х2МЮА. В последние годы для изделий, подвергаемых азотированию, используют конструкционные стали, не содержащие алюминий: 40Х, 40ХФА, 20ХЗМВФ, 30ХЗМФ1, 40ХГМ, 18Х2Н4ВА и др. Азотируют также изделия из коррозионностойких, жаропрочных и инструментальных сталей.

Технологическим достоинством азотирования, связанным с низкой температурой процесса, является незначительное коробление деталей или практически полное его отсутствие. Изменение размеров деталей в результате насыщения азотом и сопутствующей упруго-пластической деформации носит закономерный характер и может быть учтено технологическим припуском. Приближенно (без учета размеров и материала детали, а также режима азотирования) можно считать, что наружный диаметр цилиндра необходимо занижать при механической обработке под азотирование (для получения слоя глубиной 0,5 мм) на величину 0,04—0,06 мм. Изменение наружного и внутреннего диаметров иллюстрируется данными, приведенными на рис. VIII.4. Не рекомендуется азотировать детали, подверженные значительным динамическим нагрузкам.

Технологический процесс изготовления азотируемых деталей состоит из следующих операций: 1) предварительной термической обработки (обычно улучшения), обеспечивающей стали требуемые свойства; температура отпуска при этой обработке должна превышать максимальную температуру последующего азотирования и обеспечивать получение твердости, при которой сталь можно обрабатывать; 2) механической обработки детали, включая шлифование; 3) защиты участков детали, не подлежащих азотированию; в качестве защитных покрытий наиболее часто используют олово, нанесенное гальваническим путем, однако возможно применение и других покрытий, представленных в табл. VIII.14; 4) азоти-

рования; 5) окончательного шлифования или доводки изделия в соответствии с заданными допусками.

На рис. VIII.5 показано влияние легирующих элементов на глубину и твердость азотированного слоя. Рекомендуются режимы азотирования изделий из конструкционных и инструментальных сталей представлены в табл. VIII.15—VIII.16.

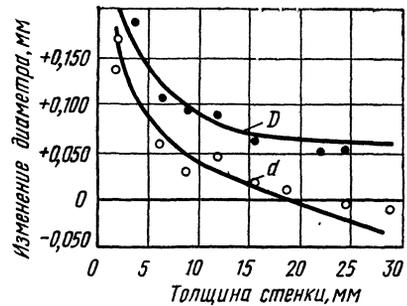


Рис. VIII.4. Изменение наружного  $D$  и внутреннего  $d$  диаметров цилиндров из стали 38Х2МЮА в зависимости от толщины стенки (азотирование при 520°С в течение 72 ч; наружный диаметр цилиндра 70 мм)

Выбор температуры процесса азотирования для изделий из конструкционных сталей определяется требованиями к толщине и твердости слоя: при высокой твердости и небольшой толщине слоя рекомендуется применять низкую температуру, при больших толщинах и меньшей твердости — более высокую температуру; при необходимости получить большую толщину и высокую твердость азотированного слоя применяют двухступенчатый режим — сначала азотирование проводят при 500—520°С, а затем температуру процесса повышают до 540—580°С (рис. VIII.6, VIII.7). Продолжительность выдержки определяется требуемой глубиной азотированного слоя и температурой процесса азотирования. Хрупкость азотированного слоя можно уменьшить путем разбавления аммиака азотом или аргоном (до 80%). Средняя скорость азотирования стали при различных температурах показана в табл. VIII.17.

Азотированием можно существенно повысить коррозионную стойкость углеродистых сталей. Азотированный слой устойчив против коррозии в водопроводной воде, атмосфере перегретого пара, в щелочных растворах, неочищенном масле, бензине, загрязненной атмосфере. Коррозии хорошо сопротивляется лишь высокоазотистая  $\epsilon$ -фаза. Поэтому для сохранения высокой коррозионной стойкости азотированной поверхности шлифование следует осуществлять на меньшую глубину или выполнять лишь притирку азотированных деталей. Процесс антикоррозионного азотирования осуществляют при температурах 600—750°С в течение 0,5—6 ч. Чем выше температура азотирования и меньше габаритные размеры изделия, тем меньше продолжительность процесса для получения коррозионностойкого азоти-

Т а б л и ц а VIII.14

Способы местной защиты изделий от азотирования

Способ защиты	Толщина наносимого слоя, мм
Гальваническое лужение, при температуре азотирования олово расплавляется и удерживается на поверхности стального изделия в виде тонкой непроницаемой для азота пленки	0,008—0,015
Гальваническое никелирование (чаще применяется для защиты от азотирования нержавеющих сталей)	0,025—0,04
Гальваническое цинкование	0,04—0,05
Гальваническое биметаллическое покрытие: свинец — цинк, медь — свинец, никель — свинец	1-й металл 0,005; 2-й металл 0,015
Жидкое стекло — его наносят окунанием детали с последующей просушкой при 90—120° С в течение 1,5 ч	—
Обмазка: свинцово-оловянистую пыль (60·40) растворяют в смеси, состоящей из 5 частей растительного масла, 1 части стеарина, 2 частей свиного сала, 2 частей пульверизованной смолы, 1 части хлористого цинка и жидкого стекла и двукратно наносят на поверхность; затем деталь просушивают при температуре 100—120° С	1—2

Т а б л и ц а VIII.15

Оптимальные режимы азотирования изделий из некоторых сталей

Марка стали	Температура азотирования, °С	Степень диссоциации аммиака, %	Продолжительность выдержки, ч	Глубина слоя, мм	Твердость HV азотированного слоя
38Х2МЮА	500—520	20—40	48—60	0,4—0,5	1000—1100
	530—550	30—50	36—42	0,5—0,6	900—1000
	500—520	20—40	15/25	0,5—0,6	850—1000
	540—560	50—60			
18Х2Н4ВА	490—510	15—30	35	0,25—0,3	650—750
	490—510	15—30	55	0,45—0,5	650—750
	500—520	20—40	55	0,5—0,55	600—700
	500—520	20—40	25/35	0,5—0,6	600—650
530—550	50—60				
40ХНМА	510—530	25—45	50—60	0,5—0,6	650
	500—520	20—40			
	530—550	50—60	25/30	0,6—0,7	700
40ХНВА, 30Х2Н2ВА 30Х2Н2ВФА 30Х2Н2ВФМА, 30Х3ВА	500	20—40	48	0,14—0,16	1000—1050
	550	40—55		0,26—0,30	900—950
	600	50—65		0,35—0,40	800—850
20Х13	500	20—40	48	0,1—0,12	1000—1050
	550	40—55		0,24—0,28	900—950
	600	50—65		0,33—0,38	780—830
15Х11МФ, 15Х12ВМФ	520—540	30—45	10/20	0,35—0,40	900—950
	570—590	50—65			
40Х14Н14В2М	560	40—55	55	0,08—0,12	800—900
	600	45—65	55	0,1—0,15	750—800
	640	50—65	55	0,12—0,18	700—780
25Х18Н8В2	560	40—55	24	0,12—0,14	950—1100
	560	40—55	40	0,16—0,20	900—950
	600	50—65	24	0,14—0,18	900—950
12Х18Н9, 08Х18Н10Т Х12М, Х12Ф1	560	40—55	50	0,2—0,25	1000—1100
	510—520	20—45	25	0,15—0,20	950—1050
	510—520	20—45	55	0,2—0,3	950—1050
3Х2В8Ф, 4Х5В2ФС 4ХВ2С, 7Х3	500—520	20—45	36	0,3—0,35	950—1050
	540—560	35—50	55	0,45—0,55	700—750

Примечание Числитель — первая ступень азотирования, знаменатель — вторая.

Таблица VIII.16

Режимы азотирования некоторых деталей машин

Марка стали	Температура азотирования, °С	Продолжительность выдержки, ч	Глубина слоя, мм	Твердость слоя HV	Назначение	
38Х2МЮА, 38Х2ВФЮА	510/540	12/42	0,5—0,6	900—1000	Гильзы цилиндров дизелей	
18Х2Н4ВА	490—500	40—48	0,35—0,4	600—700	Коленчатый вал дизеля	
40Х	500—520	18—24	0,25—0,3	500—610	Шпиндели для опор качения, ходовые винты пар скольжения	
40ХФА	500—520	18—24	0,25—0,3	610—700		
18ХГТ	500—520	18—24	0,25—0,3	630—720		
38Х2МЮА	500—520	15—20	>0,25	850—950	Шпиндели для опор скольжения, гильзы, втулки, пинолы, червяки делительных пар	
	530—550	25—40				
30Х3ВА	500—520	15—20	>0,25	720—800		
	530—550	25—40				
10Х13, 20Х13, 30Х13	500—520	55—60	0,25—0,35	900—950		Детали, испытывающие эрозионный износ (лопатки направляющего аппарата), работающие в условиях изнашивания в коррозионной среде
	520—540	20/20	0,25—0,3	850—950		
	570—590					
15Х11МФ, 15Х12ВМФ	520—540	10/18	0,3—0,4	850—900		
	570—590					
38Х2МЮА	520—540	14/40	0,4—0,6	950—1050		Винты, червяки, валики, втулки металлургических агрегатов
	560—570					

Примечание. Числитель — первая ступень азотирования, знаменатель — вторая.

Таблица VIII.17

Средняя скорость азотирования в зависимости от температуры процесса и глубины слоя

Глубина слоя, мм	Скорость азотирования, мм/ч, при температуре, °С		
	500	550	600
<0,2	0,02	0,04	—
0,2—0,4	0,015	0,03	0,06
0,4—0,6	0,01	0,02	0,03
0,6—0,8	—	0,015	0,02

рованного слоя. Оптимальные режимы выбирают так, чтобы получить беспористый слой, максимально насыщенный азотом при минимальной его хрупкости (рис. VIII.8). Иногда для антикоррозионного азотирования используют режимы, представленные в табл. VIII.18.

### Оборудование для азотирования

Техническая характеристика электропечи периодического действия, в которых обычно производят азотирование, представлена в табл. VIII.19.

Азотирование целесообразно осуществлять в печи с подвижной нагревательной камерой и двумя контейнерами (рис. VIII.9). Нагрев контейнеров в этих печах ведется попеременно: в то время как один контейнер охлаждается, другой нагревается. Печь имеет три основных узла: передвижную камеру 1, стенд 2 и контейнер 3. Каркас передвижной камеры сварной из листового и профильного проката. Он состоит из ряда П-образных рам, соединенных продольными швеллерами. Внизу эти рамы связаны с балками, на которых крепятся катки. В торцах печи расположены дверцы, на которых смонтированы нагреватели с выводами. Дверцы снабжены двумя ножами, входящими в песочный затвор, один из которых расположен под дверным проемом, а вто-

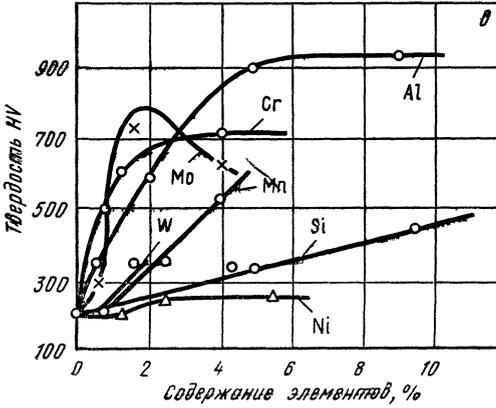
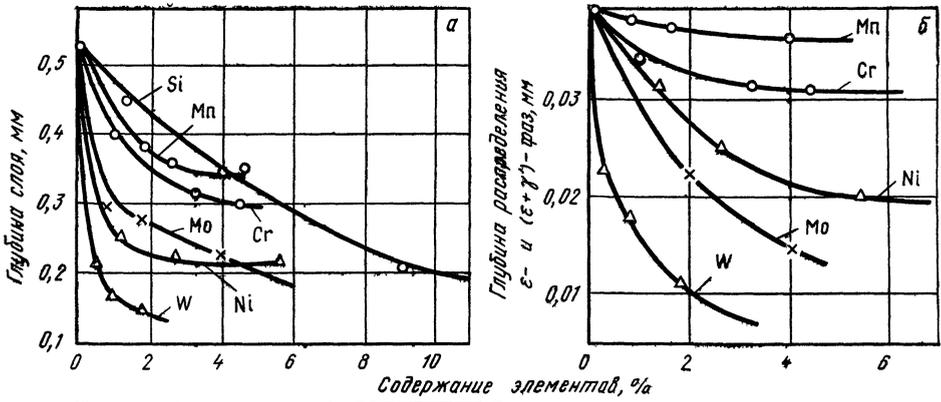


Рис. VIII.5. Влияние легирующих элементов на общую глубину азотированного слоя (а), глубину распространения  $\epsilon$ - и  $(\epsilon+\gamma)$ -фаз (б) и твердость азотированного слоя (в) (азотирование при  $550^\circ\text{C}$  в течение 24 ч)

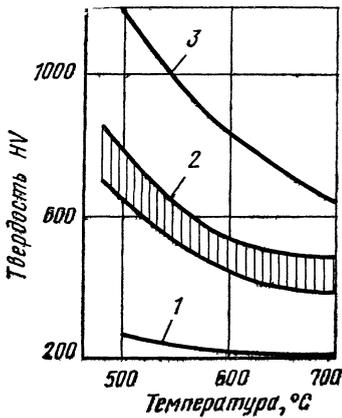


Рис. VIII.6. Зависимость твердости азотированного слоя от температуры процесса (продолжительность азотирования 48 ч):

1 — углеродистые стали (40, 45 и др.); 2 — легированные конструкционные стали (40X, 18X2H4BA, 20XГНМ и др.); 3 — сталь 38X2МЮА

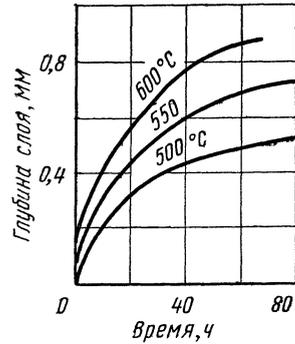


Рис. VIII.7. Изменение глубины азотированного слоя в зависимости от температуры и продолжительности процесса

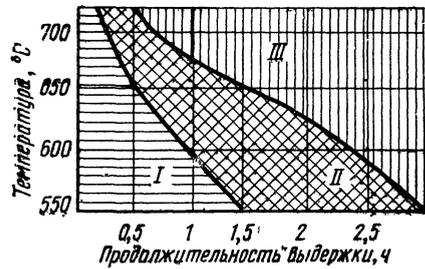


Рис. VIII.8. Оптимальные режимы антикоррозионного азотирования:

I — область пористых коррозионнонестойких слоев; II — область коррозионностойких слоев; III — область хрупких слоев

Таблица VIII.18

Режимы антикоррозионного азотирования

Группа стали	Азотируемые детали	Режим азотирования			
		температура, °С	продолжительность, мин	степень диссоциации аммиака, %	охлаждение
Низко- и среднеуглеродистая * <sup>1</sup>	Тяги, штыри, болты, вентили, мелкие детали приборов и аппаратов, резак, сварочные горелки, детали арматуры паровых котлов и др.	600* <sup>2</sup>	60—120	35—50	С печью, в воде, в масле или в муфелье, извлеченном из печи * <sup>3</sup>
		650	45—90	45—65	
		700	15—30	55—75	
Высокоуглеродистая и низколегированная	Шестерни, валики, золотники, оси, гайки, болты, штифты и т. д.	770—850* <sup>4</sup>	5—10	75—80	В масле или воде (в зависимости от марки стали)

\*<sup>1</sup> Среднеуглеродистые стали перед азотированием обычно подвергают улучшению, поэтому температура азотирования не должна превышать 650° С.

\*<sup>2</sup> При повышении температуры продолжительность выдержки уменьшают.

\*<sup>3</sup> Для повышения вязкости азотированного слоя желательно быстрое охлаждение.

\*<sup>4</sup> Температура нагрева совпадает с температурой нагрева под закалку стали. Азотирование происходит в период нагрева изделия под закалку и в процессе выдержки.

Таблица VIII.19

Техническая характеристика электропечей сопротивления периодического действия для газового азотирования

Тип	Назначение	Мощность, кВт	Температура, °С	Размер рабочего пространства, мм	Габаритные размеры печи (ширина×длина×высота), мм	Масса садки, кг
США-3,2,4,8/6ЛО1	Азотирование, отпуск	17	650	∅ 320×480	1106×1300×1700	150
США-5,7,5/6ЛО1	То же	42,5	620	∅ 500×750	1500×1630×2985	400
США-8,12/6ЛО1	»	95	650	∅ 800×1200	1940×2155×3750	1200
США-8,24/6ЛО1	»	120	650	∅ 800×2400	1942×2600×5650	2200
СНА-6,5.22.10/6М—ЛО1	Азотирование	100	650	650×2240×1000	2990×9200×3860	1250

Примечание. Расшифровка обозначений типов печей производится следующим образом: С — нагрев сопротивлением; Ш — шахтная; Н — камерная; А — предназначена для азотирования; цифры в числителе — размеры рабочего пространства (диаметр, высота или ширина, длина, высота), мм; цифра в знаменателе — рабочая температура, в сотнях °С; цифры и буквы в знаменателе — исполнение и шифр организации-разработчика. Печи этого типа поставляет Южно-Уральский завод электротермического оборудования.

рой — на стенде. Подъем дверей осуществляется вручную с помощью рукоятки, находящейся сбоку печи.

Передвижение камеры осуществляется механизмом, передающим вращающий момент каткам через ряд звеньев. Нагреватели подвешены на крючках на обеих стенках и дверцах. Над печью напротив дверей установлены экраны для защиты от теплового излучения во время поднятия дверей конструкций и оборудования, расположенных

под камерой. Контейнер представляет собой конструкцию из листовой стали. Он устанавливается на основание, имеющее желоба, заполненные песком. В желоба входят кромки контейнера, образуя песочный затвор. На основание устанавливается решетка, на которую загружаются детали. В основании контейнера имеются две воронки, в которых происходит предварительный подогрев аммиака. Через воронки проходят валы вентиляторов. Мощность печи 100 кВт. Мак-

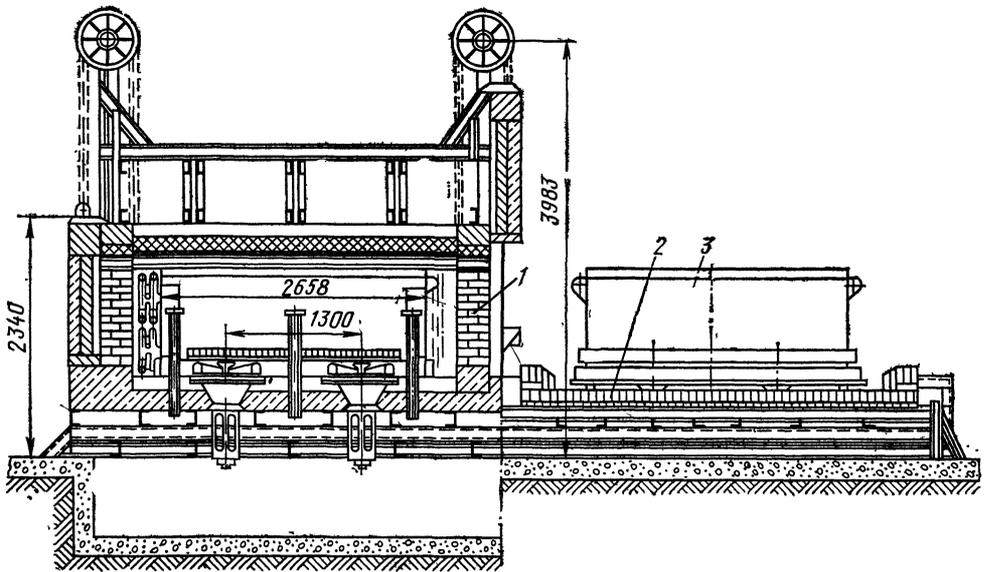


Рис. VIII.9. Печь для азотирования с передвижной нагревательной камерой

симальная рабочая температура  $650^{\circ}\text{C}$ . Рабочие размеры контейнера: ширина 750, длина 2300 и высота 950 мм. Производительность печи зависит от цикла азотирования.

#### Азотирование в тлеющем разряде

Перспективно азотирование в тлеющем разряде (ионное азотирование). Его проводят в разреженной азотсодержащей атмосфере при подключении обрабатываемых деталей к отрицательному электроду (катоде). Анодом является контейнер установки. При обработке деталей сложной конфигурации применяют специальные профилированные аноды. Между катодом (деталью) и анодом возбуждается тлеющий разряд, и ионы газа, бомбардируя поверхность катода, нагревают ее до температуры насыщения. Процесс ионного азотирования осуществляется в две стадии: очистка поверхности катодным распылением и собственно насыщение. Длительность катодного распыления 5—60 мин при напряжении 1100—1400 В и давлении 0,1—0,2 мм рт. ст. В процессе катодного распыления температура поверхности детали не превышает  $250^{\circ}\text{C}$ . Температура азотирования  $480\text{—}580^{\circ}\text{C}$ , разрежение 1—10 мм рт. ст., рабочее напряжение 400—1100 В, продолжительность процесса — от нескольких минут до 24 ч.

При азотировании в тлеющем разряде (по сравнению с печным) ускоряются диффузионные процессы (в 1,5—2 раза), обеспечивается возможность регулирования состава и строения диффузионных слоев, отмечаются незначительные деформации изделий и высокий класс шероховатости поверхности, уменьшается продолжительность процесса. Этот метод экономичен и удовлетворяет требованиям по защите окружающей среды.

#### 4. Высокотемпературная нитроцементация и цианирование

Диффузионное насыщение поверхностного слоя стальных изделий одновременно углеродом и азотом в газовой среде называется нитроцементацией, а в расплаве, содержащем цианистые соли, — цианированием. Высокотемпературной нитроцементации и цианированию подвергают в основном изделия из конструктивных углеродистых и легированных сталей при температурах  $820\text{—}950^{\circ}\text{C}$  для повышения их поверхностной твердости, износостойкости и предела выносливости.

При повышении температуры процесса содержание азота в диффузионном слое уменьшается, а содержание углерода может увеличиваться непрерывно или до определенной температуры, а затем снижаться. Таким образом, в зависимости от науглероживающей способности среды максимальное насыщение поверхностного слоя стали углеродом достигается при различных температурах. Азот, диффундируя в сталь вместе с углеродом, оказывает существенное влияние на степень насыщения поверхностного слоя углеродом и на глубину диффузии углерода (рис. VIII.10). Понижая температурную область существования  $\gamma$ -железа, азот способствует интенсивному науглероживанию стали при более низких температурах, чем при цементации. При чрезмерном насыщении стали азотом и образовании в поверхностном слое карбонитридных фаз азот может затруднять диффузию углерода в сталь.

#### Нитроцементация

При нитроцементации процесс насыщения имеет две различные по кинетике стадии. На

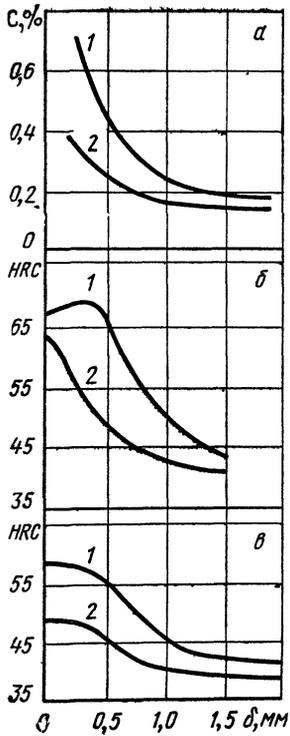


Рис. VIII.10. Изменение концентрации углерода и твердости по глубине  $\delta$  диффузионного слоя хромоникелевой стали:

*a* — содержания углерода; *б* — твердости после закалки с  $820^{\circ}\text{C}$  в воде; *в* — твердости после закалки с  $820^{\circ}\text{C}$  в воде и отпуска при  $260^{\circ}\text{C}$ ; 1 — предварительно азотирующая, 2 — цементованная

первой стадии (1—3 ч) сталь насыщается углеродом и азотом одновременно. На второй стадии при продолжающемся насыщении углеродом происходит десорбция азота, т. е. переход части абсорбированных атомов азота с поверхности металла в газовую среду (рис. VIII.11). С повышением температуры нитроцементации увеличивается содержание углерода и уменьшается содержание азота в диффузионном слое.

В качестве газовой среды при нитроцементации применяют смесь, состоящую из 2—10% аммиака и 90—98% науглероживающих газов, обычно используемых при газовой цементации (например, смесь природного газа, аммиака и эндогаза). При этом состав газовой среды меняется в широких пределах. В муфельные печи непрерывного

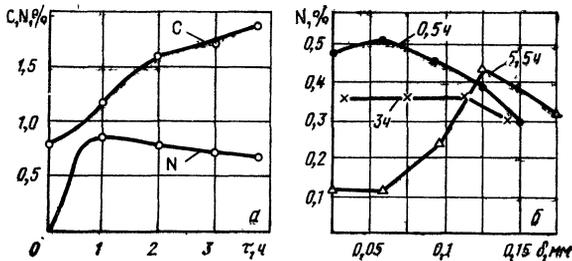


Рис. VIII.11. Влияние продолжительности нитроцементации  $\tau$  на концентрацию:

*a* — углерода и азота в ленте из стали У8, обработанной при  $800^{\circ}\text{C}$  в смеси бензола и аммиака; *б* — азота в поверхностном слое стали 30ХГТ, обработанной при  $850^{\circ}\text{C}$  в течение 0,5; 3 и 5,5 ч в паре триэтиломина

действия науглероживающий газ и аммиак обычно подают отдельно. Жидкие карбюризаторы в такие печи вводят, как и при цементации, под давлением в тонкораспыленном виде форсункой. Расход газа при нитроцементации в безмуфельных печах приведен в табл. VIII.20, а ее скорость — в табл. VIII.21.

В табл. VIII.22 показано влияние соотношения между цементующим и азотирующим газами на содержание углерода и азота. В

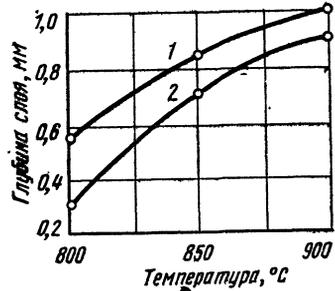


Рис. VIII.12. Влияние температуры на глубину цементованного и нитроцементованного слоя образцов из стали 10 (выдержка 3 ч). Карбюризатор: 1 — газ пиролиза керосина и аммиак; 2 — газ пиролиза керосина

диффузионном слое. Процесс обычно протекает при  $850\text{--}870^{\circ}\text{C}$ , а затем детали подвергаются закалке непосредственно из печи (с подстуживанием до  $800\text{--}820^{\circ}\text{C}$ ) и отпуску при  $150\text{--}180^{\circ}\text{C}$ . Иногда производят ступенчатую закалку.

При оптимальных условиях насыщения структура нитроцементованного слоя должна состоять из мелкоигольчатого мартенсита, небольшого количества мелких равномерно распределенных карбонитридов и 25—30% остаточного аустенита. Твердость слоя после закалки и низкого отпуска HRC58—64 (HV570—690). Максимальные показатели прочности достигаются лишь при оптимальном для данной стали содержании углерода и азота в поверхностной зоне нитроцементованного слоя (табл. VIII.23).

При высоком содержании углерода в нитроцементованном слое образуются карбонитриды, располагающиеся преимущественно по границам зерен в виде сплошной или разорванной сетки. Наиболее легко карбонитриды образуются в стали, легированной титаном, ванадием и хромом. Переход углерода и легирующих элементов в карбонитриды понижает устойчивость аустенита, что способст-

Таблица VIII.20

Расход технологических газов при высокотемпературной нитроцементации в безмуфельных агрегатах

Технологический газ	Расход газов, %, при нитроцементации стали	
	легирующей	углеродистой
Городской газ . . .	3,5—5,5	10—13
Аммиак . . . . .	2—3,5	6,5—7,5
Эндотермический газ . . . . .	91—94	79,5—83,5

Таблица VIII.21

Приближенные значения средней скорости высокотемпературной нитроцементации при различных температурах

Глубина слоя, мм	Скорость процесса, мм/ч, при температурах, °С		
	860	930	950
<0,5	0,20	0,4	0,5
0,5—1,0	0,15	0,3	0,4
1—1,5	0,12	0,2	0,3

Таблица VIII.22

Влияние соотношения между цементирующим и азотирующим газами на содержание углерода и азота в нитроцементированном слое

Состав газовой атмосферы, %			Длительность насыщения, ч	Содержание углерода в слое, %, на расстоянии от поверхности, мм				Содержание азота в слое, % на расстоянии от поверхности, мм			
городской газ	природный газ	аммиак		0,05	0,15	0,25	0,35	0,05	0,15	0,25	0,35
50	25	25	2,0	0,88	0,50	0,28	0,23	0,31	0,14	0,02	0,019
60	35	5	1,75	0,87	0,55	0,33	0,25	0,13	0,08	0,011	0,011
75	—	25	1,75	0,78	0,52	0,32	0,25	0,33	0,28	0,09	0,03
—	50	50	1,5	0,83	0,58	0,28	0,20	0,45	0,22	0,04	0,01

Таблица VIII.23

Оптимальное содержание углерода и азота в поверхностной зоне нитроцементированного слоя

Марка стали	Глубина нитроцементированного слоя, мм	Толщина стружки, мм	Концентрация в стружке, %	
			C	C + N
40X	0,25—0,35	0,035	0,65—0,9	1,0—1,25
		0,05	0,6—0,85	0,85—1,2
		0,10	0,55—0,8	0,8—1,0
25XГТ	0,5—0,7	0,025	0,65—0,9	1,0—1,25
		0,05	0,6—0,85	1,0—1,15
		0,10	0,55—0,80	0,9—1,05
25XГМ	0,5—0,8	0,025	0,75—1,2	1,3—1,65
		0,05	0,65—1,05	1,25—1,55
		0,10	0,6—0,9	1,15—1,5

вует появлению в нитроцементированном слое троостита. Образование сетки карбонитридов и троостита снижает предел выносливости, пластичность и вязкость. Оптимальная концентрация углерода в сумме C+N на поверхности нитроцементированного слоя должна составлять: для стали 25XГТ, 0,65—0,9%, для стали 25XГМ 0,75—1,2%.

К преимуществам высокотемпературной нитроцементации по сравнению с газовой цементацией следует отнести: более низкую температуру процесса (850—870°С вместо 920—950°С) при одинаковой его скорости или большую скорость процесса при той же температуре (рис. VIII.12); отсутствие выделения сажи на поверхности нитроце-

ментуемых деталей, стенках печи и нагревателей; меньше коробление и деформацию деталей; более высокую износостойкость и коррозионную стойкость деталей (благодаря дополнительному насыщению стали азотом).

#### Цианирование

Для высокотемпературного цианирования применяют ванны, состав которых приведен в табл. VIII.24.

Состав I используют для цианирования на небольшую глубину (до 0,35 мм). Непосредственно после цианирования при 820—870°С детали закаливают, а затем отпускают при

Таблица VIII.24

Состав ванн и режимы высокотемпературного цианирования деталей из конструкционных сталей

Номер состава ванны	Состав ванн, %					Температура цианирования, °С	Продолжительность процесса, ч	Глубина слоя, мм	Содержание в слое, %		Твердость слоя HRC
	NaOH	NaCl	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	BaCl <sub>2</sub>	BaCO <sub>3</sub>				N	C	
1	20—25	25—50	25—50	—	—	840	0,5	0,15—0,20	0,8—1,2	0,6—0,7	59—62
						840	1,0	0,2—0,25			
						870	0,5	0,2—0,25			
						870	1,0	0,25—0,35			
2	8—12	30—55	≤10	12—20	35—50	840	1,5	0,25—0,3	0,2—0,3	0,8—1,2	58—64
						900	1,0	0,5—0,6			
						900	2,0	0,7—0,8			
						900	4,0	1—1,2			
3	3—8	≤30	—	≥30	≤4	900	0,5	0,2—0,25	0,2—0,3	0,8—1,2	58—64
						900	0,75	0,3—0,5			
						900	1,5	0,5—0,8			
						950	2,0	0,8—1,1			
						950	3,0	1,0—1,2			
						950	5,5	1,4—1,6			

160—200°С. Более глубокое цианирование (на глубину 1—2 мм) осуществляют в ваннах состава 2 и 3, содержащих хлористый барий. После глубокого цианирования детали охлаждают на воздухе, а затем подвергают закалке и низкому отпуску.

За счет высокотемпературного цианирования повышаются поверхностная твердость, износостойкость, предел выносливости при изгибе и контактная выносливость. Структура диффузионного слоя после цианирования такая же, как и после нитроцементации. С повышением температуры цианирования содержание азота в слое уменьшается, а содержание углерода увеличивается, и по своим свойствам цианированный слой приближается к цементованному.

К недостаткам высокотемпературного цианирования можно отнести сложность регулирования состава ванн, большие потери тепла, токсичность и высокую стоимость применяемых солей.

## 5. Борирование

Борирование — это процесс химико-термической обработки, заключающийся в диффузионном насыщении поверхностных слоев изделий из металлов и сплавов бором при нагревании в соответствующей борсодержащей среде. Наиболее часто борирование применяют для повышения износостойкости изделий из металлов и сплавов. Для борированных слоев характерны высокая коррозионная стойкость в ряде агрессивных сред, повышенная окислительная стойкость, сохранение высокой твердости при нагреве и т. д. Это позволяет использовать борированные изделия из сталей и сплавов в особо жестких условиях эксплуатации: трение скольжения без смазки, абразивное изнашивание, изнашивание в вакууме, при повышенных и высоких температурах, в агрессивных средах и т. д.

Борированию можно подвергать любые стали. Борированный слой имеет «игльчатое» строение и состоит из боридов FeB (на поверхности) и Fe<sub>2</sub>B. Под слоем боридов располагается переходной слой, состоящий из α-раствора бора в железе. На легированных сталях под слоем сплошных боридов образуется зона α-раствора, боридов железа и легирующих элементов.

Необходимым условием формирования диффузионного слоя является наличие у насыщенной поверхности активного атомарного бора; кроме того, температура и длительность выдержки должны обеспечить протекание диффузии атомарного бора в стали с образованием химических соединений — боридов железа.

### Способы и технология борирования

Борирование можно осуществлять различными методами. Их классификация представлена на рис. VIII.13.

При борировании в твердых средах (в порошках) в качестве насыщающей среды можно использовать порошки различных борсодержащих веществ: аморфного бора, карбида бора, ферробора, ферроборала, никельбора и их смеси. С целью предотвращения спекания порошков и их налипания на боримые изделия к ним рекомендуется добавлять «инертные добавки»: оксиды алюминия, магния, измельченный шамот (в количестве от 20 до 60%). Для ускорения процесса борирования в насыщающую смесь следует вводить 1—5% NH<sub>4</sub>Cl, KF, NaF, KBF<sub>4</sub> и др. Процесс борирования в порошках можно проводить различными способами: в герметичных и негерметичных контейнерах, в вакууме, в защитных восстановительных атмосферах, в псевдооживленном слое. При использовании герметично закрытых контейнеров их загружают в печи и нагревают до температуры порядка 950—1050°С. Продолжительность выдержки за-

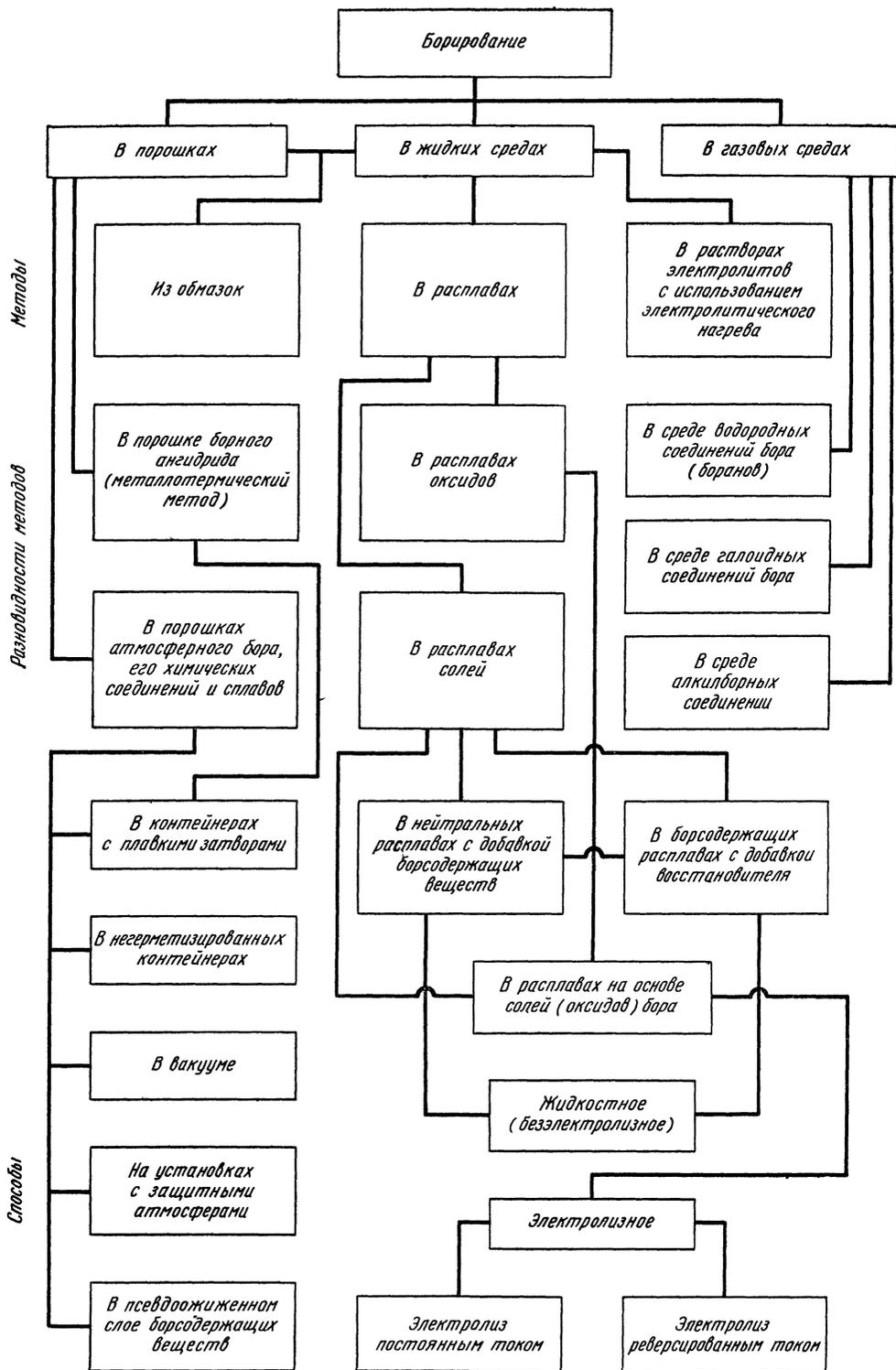


Рис VIII 13 Классификация методов борирования

висит от требуемой толщины боридного слоя и обычно составляет 3—8 ч. Достоинством этого способа является простота технологии процесса. К недостаткам следует отнести малую производительность процесса, высокую трудоемкость подготовительных работ (приготовления рабочих смесей и упаковки деталей в контейнере), низкую теплопроводность и гигроскопичность насыщающих смесей, необходимость их регенерации в случае многократного использования, высокую стоимость борсодержащих порошков.

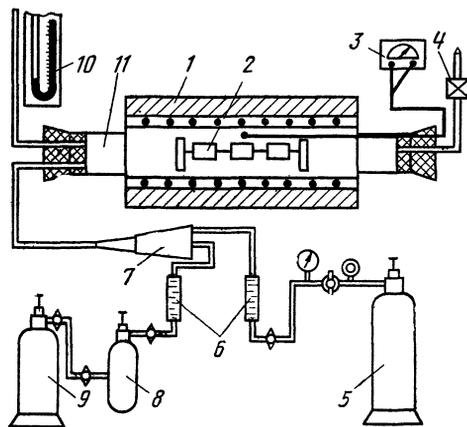


Рис. VIII.14. Схема установки для газового борирования:

1 — электрическая печь сопротивления; 2 — образцы (изделия); 3 — регулятор температуры; 4 — игольчатый вентиль; 5, 9 — баллоны с борсодержащим газом и газом-разбавителем; 6 — ротаметр; 7 — инжекторный смеситель; 8 — промежуточная емкость с водородным редуктором; 10 — ртутный манометр; 11 — реактор (муфель)

Это и определило крайне ограниченное промышленное применение процесса борирования в порошках.

Борирование в газовой среде, как и в порошках, имеет ограниченное распространение. Оно осуществляется за счет разложения газообразных соединений бора: дибора  $B_2H_6$ , треххлористого бора  $BCl_3$ , трехбромистого бора  $BBr_3$  и других веществ. Борсодержащие газы разбавляют водородом или аргоном. При температуре выше  $500^\circ C$  происходит диссоциация газов с об-

разованием водорода и атомарного бора. Бор, обладая при  $850—900^\circ C$  высокой активностью, при осаждении диффундирует в глубь металла, образуя бориды. Глубина слоя боридов обычно не превышает  $0,1$  мм. Существенными недостатками газового борирования являются следующие: применение токсичных взрывоопасных смесей, необходимость в специальном оборудовании, нестабильность слоев и неравномерность их по глубине, твердости и плотности. Схема установки для газового борирования приведена на рис. VIII.14.

Жидкостное безэлектролизное борирование осуществляют в расплавах, содержащих буру с добавками ферроборала, карбида бора или других компонентов. В табл. VIII.25 приведены некоторые составы, применяемые для жидкостного борирования. Процесс обычно осуществляют в ваннах при температуре  $850—960^\circ C$ . Неустойчивость расплава, неравномерный по толщине борированный слой, значительная продолжительность процесса для получения слоя глубиной  $0,15$  мм препятствуют внедрению этого способа в промышленное производство.

Наиболее распространено электролизное борирование. Его производят в расплавленной буре или в смеси буры с поваренной солью. Активные атомы бора при электролизном борировании образуются при пропускании через расплав буры постоянного тока. Насыщаемые бором детали подключают в цепь электролиза в качестве катода; анодом обычно служат графитовые (угольные) стержни.

Электролизное борирование осуществляют при температурах  $900—980^\circ C$  и плотности тока  $j=0,08—0,25$  А/см<sup>2</sup>. Продолжительность выдержки при температуре процесса 2—5 ч; при этом обеспечивается получение слоя глубиной  $0,16—0,28$  мм, обладающего высокой твердостью, плотностью и износостойкостью.

В состав установки для электролизного борирования входят (рис. VIII.15) печь-ванна, системы питания постоянным и переменным током и система автоматического контроля и регулирования температуры. Печи-ванны для электролизного борирования изготавливают на базе существующих шахтных электрических печей, используемых для газовой цементации, или печей-ванн, применяемых для высокотемпературного жидко-

Таблица VIII.25

Составы, применяемые при жидкостном борировании

Номер состава	Компоненты	Содержание, %	Номер состава	Компоненты	Содержание, %
1	Бура Карбид бора ( $B_4C$ )	60	3	Поваренная соль Хлористый барий Ферроборал	18
		40			65
2	Поваренная соль Хлористый барий Карбид бора ( $B_4C$ ),	20	4	Бура Карбид кремния	70
		71			30
		9			

Таблица VIII.26

Рекомендуемая глубина борированного слоя для деталей различного назначения

Детали	Условия работы и характер нагрузок	Требования к детали	Глубина борированного слоя, мм
Пальцы, втулки, валики, оси, цилиндры из сталей 25, 45, 45X, 50Г, 40ХС, 65Г, 30ХГСА и т. п.	Абразивное изнашивание при умеренной статической нагрузке	Высокая износостойкость	0,15—0,30
	Абразивное изнашивание при одновременном воздействии статической и циклической нагрузок	Высокая износостойкость, запас пластичности, повышенный предел выносливости	0,12—0,18* 0,12—0,25**
	Абразивное изнашивание при возможных ударных нагрузках	Высокая износостойкость, пластичность и сопротивление ударам	0,1—0,15*
Инструмент, детали приспособлений и прессформ из сталей У8, У9, ХВГ, 5ХГТ, 5ХНВ и т. д.	Изнашивание без смазки при комнатной и повышенных температурах	Износостойкость и отсутствие разрушения от динамической нагрузки; высокая контактная прочность	0,06—0,10

\* Для деталей, подвергаемых после борирования упрочняющей термической обработке (закалке).

\*\* Для деталей, работающих при относительно небольших нагрузках и не подвергающихся после борирования закалке.

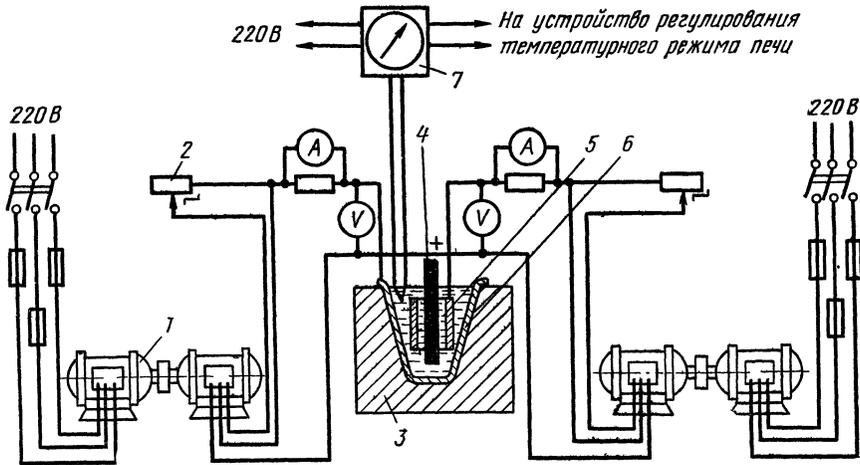


Рис. VIII.15 Схема установки для электролизного борирования:

1 — генератор; 2 — реостаты; 3 — печь-ванна; 4 — графитовый анод; 5 — деталь; 6 — тигель; 7 — потенциометр

стного цианирования и термической обработки. При этом устанавливают сварной тигель из нержавеющей или жароупорной стали. Помимо электрических печей, для электролизного борирования могут быть использованы печи-ванны с газовым обогревом и электродные печи-ванны. В качестве источников постоянного тока применяют мотор-генераторы типа АНД 250/500, АНД 750/1500 и АНД 2500/5000 и различного рода выпрямители (селеновые, германиевые, купруксные: ВКГ-100А, ВАГТ-12-600, ВСГ-3А) с напряжением от 6 до 24 В.

По окончании процесса борирования детали извлекают из расплава и непосредственно закалывают или охлаждают на воздухе. Остатки буры отмывают в горячей

воде. Для ускорения отмывки иногда применяют ультразвуковые колебания. Поэтому в комплект оборудования для электролизного борирования должны входить закалочные и моечные ванны, которые могут быть оборудованы спаренными ультразвуковыми преобразователями ПМС-6А или ПМС-15А с амплитудой колебаний 3—12 мкм и частотой колебаний 18—22 кГц. Ультразвуковые преобразователи работают в паре с ультразвуковым генератором УЗГ-10М.

Для интенсификаций электролизного борирования иногда применяют реверсивный ток с малыми периодами реверсирования. При этом часть времени полного цикла реверсирования деталь служит анодом, а часть — временем — катодом. Установки электролиз-

ного борирования могут быть оснащены как контактными, так и бесконтактными устройствами реверсирования тока. За счет реверсирования скорость формирования боридного слоя можно увеличить в 1,3—2 раза. При этом в 2—3 раза уменьшается унос электролита с насыщаемыми изделиями.

Основными технологическими параметрами процесса электролитного борирования являются катодная плотность тока, температура расплава и продолжительность электролиза. От их величины зависят глубина и свойства борированного слоя. Данные

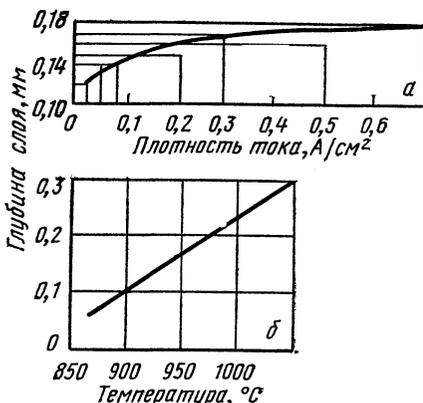


Рис. VIII.16. Зависимость глубины борированного слоя от плотности тока (а) и температуры (б)

о рекомендуемой глубине слоя для изделий различного назначения представлены в табл. VIII.26.

На рис. VIII.16 показана зависимость глубины борированного слоя от плотности тока и температуры. Оптимальным диапазоном катодной плотности тока является 0,05—0,08 А/см<sup>2</sup>. При необходимости борировать детали с большой поверхностью плотность тока может быть уменьшена до 0,03 А/см<sup>2</sup>. Оптимальным диапазоном температуры расплава при электролитном борировании деталей из конструкционной среднелегированной стали является 930—950° С. Борирование при этой температуре в течение 2,5—4 ч обеспечивает получение слоя глубиной 0,12—0,25 мм. Стремиться получить борированный слой глубиной более 0,25 мм не следует из-за увеличения хрупкости, приводящей к образованию сколов при последующей термической обработке. Борирование деталей из высоколегированных сталей производят при более высокой температуре (1000° С) в установках с внутренним электродным нагревом.

### Термическая обработка борированных изделий

Для предотвращения хрупких разрушений борированных деталей необходима термическая обработка, назначение которой измельчить зерно, уменьшить неоднородность структуры переходной зоны и изменить характер распределения остаточных напряже-

ний, возникших при охлаждении с температуры борирования, по сечению деталей. В зависимости от состава стали выполнение этих требований можно обеспечить с помощью нормализации либо высокоого отпуска, либо совокупности этих операций. Термическая обработка для выравнивания структуры подслоной зоны обязательна для всех борированных деталей независимо от условий работы и предъявляемых к ним требований. Для предотвращения продавливания твердого и хрупкого борированного слоя у деталей, работающих при высоких удельных нагрузках динамического характера, их следует подвергать упрочняющей термической обработке с целью повышения твердости сердцевины ( $\geq$  НВ400). Такой термической обработкой может быть закалка при сквозном прогреве деталей и поверхностная закалка с нагревом токами высокой частоты на глубину не менее 2 мм. Оптимальным вариантом закалки со сквозным прогревом борированных деталей является изотермическая, сопровождающаяся наименьшей деформацией детали и не вызывающая разрушения и скалывания борированного слоя. В табл. VIII.27 приведены некоторые рекомендации по выбору стали и режимов предварительной и окончательной упрочняющей термической обработки деталей, предназначенных для работы в разных условиях.

В табл. VIII.28 в качестве примера показано влияние термической обработки борированных деталей из стали 40ХС на прочность и пластичность при изгибе.

Характеристикой пластичности является остаточный угол загиба образца после его поломки. Замечено, что нормализация перед высоким отпуском среднелегированных сталей увеличивает склонность к скалыванию борированного слоя при последующей поверхностной закалке с нагрева токами высокой частоты.

Дефекты, характерные для борированных деталей, приведены в табл. VIII.29.

### Применение борирования

На металлургических предприятиях электролитному борированию подвергают оси шлепперов, направляющие ролики, траки и ролики башмака трубосварочного стана, ролики конвейеров, втулки, пальцы и зубчатые колеса различных механизмов, работающие в абразивной среде, звездочки транспортеров, оправки холодного волочения труб, фрикционные диски токарно-винторезных станков, мундштуки для электродной проволоки наплавочных установок, сопла гидросбива окалины штрипсового стана, вкладыши вводных проводов проводочного стана, лопатки ротора эксгаустера и др. Перед борированием детали подвергают электрохимической полировке. Борирование проводят на глубину 0,15—0,25 мм при температуре 920—950° С и плотности тока 0,1—0,15 А/см<sup>2</sup> в течение 3,5 ч. Стойкость этих деталей в результате борирования повышается в 3—5 раз.

Борирование позволяет существенно повысить износостойкость пальцев и втулок

Т а б л и ц а VIII.27

## Режимы термической обработки борированных деталей

Условия работы детали	Требования, предъявляемые к детали	Марка стали	Глубина борированного слоя, мм	Режимы термической обработки	
				предварительной	упрочняющей
В абразивной среде при давлении <math><100 \text{ кгс/см}^2</math>	Высокая износостойкость	20, 25, 35, 40, 45	0,1—0,3	Нормализация или отпуск при 650° С	Не требуется
В среде сухого или мокрого абразива при давлении >math>>100 \text{ кгс/см}^2</math>	Высокие износостойкость и статическая прочность	45, 50, 50Г, 45Х, 40ХС и др.	0,12—0,23	Отпуск при 650° С	Закалка с нагрева токами высокой частоты на глубину 1,5—2 мм, отпуск при 250° С или изотермическая закалка на твердость сердцевины HB415—514
В абразивной среде при давлении 150—200 кгс/см <sup>2</sup> и одновременном воздействии статических, циклических и динамических нагрузок	Высокие износостойкость, статическая прочность, сопротивление циклическим и динамическим нагрузкам	45Х, 50Г, 50ХФ, 40ХН, 40ХС, и т. п.	0,12—0,2	То же	Закалка с нагрева токами высокой частоты на глубину 1,5—2,5 мм, отпуск при 250° С  Закалка с нагрева токами высокой частоты на глубину 1,5—2,5 мм, отпуск при 250° С  Закалка с нагрева токами высокой частоты на глубину 1,5—2,5 мм, отпуск при 250° С. Объемная закалка на воздухе и отпуск при 420° С
		45ХНФА, 25ХНМА и т. п.	0,12—0,23	» »	

Т а б л и ц а VIII.28

## Свойства борированных образцов из стали 40ХС после различной термической обработки

Термическая обработка деталей		Глубина борированного слоя, мм	Предел прочности при изгибе, кгс/мм <sup>2</sup>	Остаточный угол загиба, град	Твердость НВ	
предварительная	упрочняющая				поверхностного закаленного слоя	сердцевины
—	—	0,14—0,15	150—210	5—40	—	255—285
Нормализация, отпуск при 650° С, 3 ч	—	0,15—0,18	135—145	75—85	—	255—277
—	Изотермическая закалка	0,13—0,15	300—340	15—25	—	415—477
Отпуск при 650° С, 3 ч	То же	0,13—0,16	300—350	20—30	—	415—477
—	Закалка с нагрева токами высокой частоты на глубину 1,5—2,5 мм, отпуск при 250° С	0,14—0,17	190—220	0—20	444—514	248—302
Отпуск при 650° С, 1 ч	То же	0,14—0,17	180—240	0—30	444—514	248—302
Отпуск при 650° С, 3 ч	» »	0,15—0,19	320—360	30—110	444—514	248—302
Нормализация, отпуск при 650° С, 2 ч	» »	0,15—0,19	316—355	19—45	444—514	248—302
Отпуск при 650° С, 1 ч	То же, но отпуск при 450° С	0,14—0,18	230—250	36—74	375—444	248—302
Отпуск при 650° С, 3 ч	То же	0,14—0,18	240—245	44—118	375—444	248—302
Нормализация, отпуск при 650° С, 2 ч	» »	0,14—0,18	240—265	35—70	375—444	248—302

Дефект	Возможные причины	Меры исправления	Меры предупреждения
Недостаточная глубина борированного слоя	Нарушение технологического процесса борирования: пониженная температура, недостаточная продолжительность, загрязнение расплава	Подвергнуть дополнительному борированию, предварительно проверив химический состав расплава и очистив его от примесей	Соблюдать технологический процесс борирования
Неравномерная глубина и наличие пятен с малым содержанием бора	Недостаточная жидкотекучесть расплава. Несовершенство конструкции токоподводящих приспособлений	Проверить химический состав расплава, произвести дополнительное борирование	Следить за составом и чистотой расплава. Изменить конструкцию токоподводящих приспособлений, число одновременно борлируемых деталей и схему расположения анодов
Продольные трещины с выкрашиванием борированного слоя	Наличие на поверхности детали до борирования металлургических дефектов: волосовин, закатов и т. п.	Неисправим	Ужесточить требования к качеству поверхности деталей до борирования
Пониженная износостойкость	Поверхностное обезуглероживание деталей до борирования	»	Ужесточить требования к качеству поверхности деталей, не допускать обезуглероживания до чистого феррита
Высокая хрупкость и сколы борированного слоя при отсутствии термической обработки	Завышенная температура борирования. Большая продолжительность борирования и высокая плотность тока. Загрязнение расплава графитовыми включениями	Детали, имеющие сколы, исправить невозможно; для уменьшения хрупкости следует произвести отпуск при 650° С	Соблюдать технологический процесс борирования, следить за чистотой расплава, проводить отпуск при 650° С после борирования
Крупные и мелкие сколы борированного слоя после поверхностной закалки с нагрева токами высокой частоты	Большая глубина борированного слоя (>0,2 мм). Неудовлетворительно проведен отпуск после борирования	Неисправим	Ужесточить контроль за проведением отпуска после борирования, установить глубину борированного слоя в пределах 0,15—0,2 мм, отработать режим закалки с нагрева токами высокой частоты
Шелушение, растрескивание борированного слоя и значительное число мелких сколов после объемной (изотермической) закалки	Неудовлетворительно проведен отпуск после борирования. Вместо отпуска проведена нормализация. Детали плохо отмыты от осадков. Нарушен режим нагрева под закалку	»	Ужесточить контроль за проведением отпуска. Отменить нормализацию, тщательно отмывать детали от осадков после борирования. Нагревать детали под закалку в соляных ваннах
Низкая прочность и особенно пластичность борированных деталей после упрочняющей термической обработки	Неудовлетворительно проведен отпуск после борирования (мала продолжительность, велик объем садки, неравномерен прогрев деталей, низка температура). Нарушен режим закалки	Провести отпуск при температуре 650° С и повторную упрочняющую обработку по действующей технологии	Ужесточить контроль за соблюдением всех операций термической обработки после борирования

Инструмент и его назначение	Марка стали*	Глубина борированного слоя, мкм	Режим термической обработки			Твердость HRC сердцевины	Условия эксплуатации инструмента		Степень увеличения стойкости	Способ борирования
			температура закалки, °C	охлаждающая среда	температура отпуска, °C		материал деталей	усилие, тс		
Матрица для штамповки стакана пружины сцепления трактора	У8	150	—	—	—	—	Сталь 08кп, лист, $\delta=1,5$ мм	100	1,5	Электролизный в расплавленной буре
Матрица для глубокой вытяжки чехла коробки дорожного велосипеда	(P18) 40X	200	850	Масло	180—200	54—56	Сталь 08кп, лист, $\delta=0,8$	18	3	Жидкостный в расплаве буры с карбидом бора
Матрица вытяжного штампа	У8	120	850	»	250—270	42—45	Латунь Л-62, лист, $\delta=1$ мм	10	5	То же
Ролики для гибки рамки и ушка велосипеда	40X(У8)	150	850	»	250—270	42—45	Сталь 10, диаметр 5 мм	32	7	Электролизный в расплавленной буре
Пуансоны для гибки сепараторов подшипников	ШХ15, ШХ15СГ	120	830	»	150—170	60—62	Сталь 08кп, лента, $\delta=1$ мм	80	12	Жидкостный в расплаве: 70% буры + 15% В <sub>4</sub> С + 15% SiС
Матрица для гибки колпачка карданных подшипников	ШХ15, ШХ15СГ	100	850	»	150—170	60—62	То же, $\delta=0,8$ мм	—	14	Электролизный в расплавленной буре
Матрица для формовки чашки вилки велосипеда	40X(У10)	200	850	»	180—200	54—56	То же, $\delta=2,5$ мм	100	8	Жидкостный в расплавленной буре
Матрица для калибровки обоймы тормозной втулки	X12M1 (P18)	100	920	Воздух	150—170	60—62	65Г, лента, $\delta=1$ мм	32	5	Электролизный в расплавленной буре
Матрица гибочных штампов	X12Ф1	50	950	Масло	250—270	42—45	Сталь 08кп, лента, $\delta=6$ мм	18	4	То же
Вставка штампа для высадки головки заклетки	40X (X12Ф1)	110	840	»	180—200	50—52	Сталь 20, диаметр 10 мм	—	15	Жидкостный в расплаве буры с карбидом бора

\* В скобках указана марка стали, ранее применявшейся для изготовления штампов.

Таблица VIII.31  
Упрочнение борированием штампов для горячего деформирования металлов

Инструмент и его назначение	Марка стали	Способ борирования	Глубина борированного слоя, мкм	Режим термической обработки			Твердость HRC сердцевины	Степень увеличения стойкости
				температура закали, °С	охлаждающая среда	температура отпуска, °С		
Вставки на кузнечные валки для горячей раскатки колец железнодорожных подшипников	ШХ15СГ	Электролизный	150	830	Масло	500	35—38	1,5
Выталкиватели для штамповки шатуна трактора	У8	»	160	780	Вода	180	—	2,2
Матрицы для горячей высадки головок болтов	3Х2В8Ф	Жидкостный в расплаве карбида бора	80	1060	Масло	600	47—50	6
Матрицы и пуансоны для горячей штамповки латунных изделий	5ХНВ	То же	100	850	»	350	48—50	10
Выталкиватели и вставки штампа для горячей штамповки шестерен	5Х3В3МФС	Электролизный	80	1000	»	600	55—56	1,6

Таблица VIII.32  
Повышение стойкости деталей технологической оснастки борированием

Инструмент и его назначение	Марка стали	Способ борирования	Глубина борированного слоя, мкм	Режим термической обработки			Условия эксплуатации инструмента		Твердость HRC сердцевины	Степень увеличения стойкости
				температура закали, °С	охлаждающая среда	температура отпуска, °С	материал деталей	оборудование		
Накатки для спиловочных дисков	5ХНТ	Электролизный	100	860	Масло	160	ШХ15 и ШХ15СГ отожженные	Токарный станок	52—55	5
Цанги зажимные	65Г	»	150	820	»	160	То же	Токарные автоматы	56—58	3
Цанги подающие	65Г	»	150	820	»	160	»	То же	56—58	3
Крышка кондуктора для сверления сепараторных гнезд	20	Жидкостный в расплаве карбида бора	200	Без термической обработки			Латунь ЛС-59	Сверлильный автомат	—	2,5

гусеничных машин, элементов втулочно-роликовой буровой цепи, пальцев черпаковых цепей земснарядов, армирующих пластин пескоструйного аппарата, лопаток и сопел дробеструйного аппарата, труб дымососов, втулок грязевых насосов, дисков пяты турбобура и штоков буровых насосов, шестерен открытых передач, бандажных роликов, деталей топливной аппаратуры и др. В табл. VIII.30—VIII.32 приведены данные, иллюстрирующие применение борирования для повышения стойкости инструмента.

## 6. Хромирование

Хромированием называется процесс диффузионного насыщения поверхности стальных изделий хромом при температурах

VIII.17). Влияние температуры и продолжительности выдержки на глубину хромированного слоя показано на рис. VIII.18.

Диффузионное хромирование осуществляют различными методами. Наиболее распространено хромирование в порошках и обмазках. В этом случае хромируемые детали помещают в смесь порошков, содержащую 50% феррохрома (или хрома), 49% окиси алюминия  $Al_2O_3$  и 1% хлористого аммония. Близок к указанному и состав обмазок. Температура, при которой происходит насыщение деталей хромом, 1000—1050° С. При хромировании в вакууме насыщение поверхности деталей хромом происходит в основном благодаря образованию паровой фазы, содержащей хром и в незначительной мере вследствие контакта деталей с порошком хрома. Процесс осуществляют при температуре 1050—1100° С.

Рис. VIII.17. Влияние легирующих элементов на глубину хромированного слоя (хромирование при 980° С, 3 ч)



900—1300° С в соответствующей хромосодержащей среде. За счет диффузионного хромирования повышаются устойчивость стали против газовой коррозии (до температуры 800° С), коррозионная стойкость сталей при комнатной температуре в пресной и морской воде, азотной, уксусной и фосфорной кислотах, эрозийная стойкость при комнатной и повышенных температурах. При хромировании изделий из стали, содержащей более 0,3% С, существенно повышаются их твердость и износостойкость. Хромировать можно изделия из любой стали.

При хромировании стальных изделий благодаря большому сродству хрома к углероду происходит встречная диффузия углерода из внутренних слоев изделия к поверхности. В результате этого в поверхностном слое изделий из средне- и высокоуглеродистых сталей наблюдается повышенное содержание углерода (до 6—8%) и образуется сплошной карбидный слой, обладающий повышенной хрупкостью и высокой твердостью (более HV1300). Диффузионный слой низкоуглеродистой стали состоит из твердого раствора углерода и хрома в  $\alpha$ -железе и имеет невысокую твердость (HV220 и менее).

Легирующие элементы увеличивают или уменьшают глубину хромированного слоя в основном в зависимости от их влияния на положение границ области аустенита в двойной системе железо — легирующий элемент. Молибден, вольфрам, кремний, ванадий и другие элементы, выклинивающие эту область, увеличивают глубину слоя; никель и марганец, расширяющие ее, действуют в противоположном направлении (рис.

Хромирование в газовой среде происходит в результате образования хлорида хрома  $CrCl_2$  при взаимодействии хрома со смесью соляной кислоты и водорода; обра-

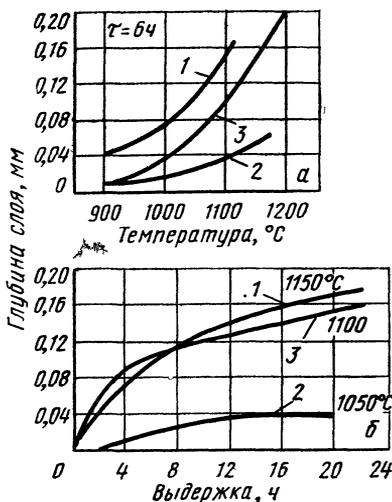


Рис. VIII.18 Влияние температуры (а) и продолжительности выдержки (б) на глубину хромированного слоя:

1 — технически чистое железо; 2 — сталь У8; 3 — сталь 12Х18Н10Т

зовавшийся при взаимодействии  $CrCl_2$  с  $H_2$  атомарный хром диффундирует в поверхностные слои детали. При хромировании в керамических материалах пористый фарфор, пеношамот или глина предварительно

Таблица VIII.33

## Режимы хромирования

Марка стали	Режим хромирования		Результаты хромирования		
	температура, °C	продолжительность, ч	глубина слоя, мм	твёрдость HV	достигаемые свойства
<i>Низкоуглеродистая сталь</i>					
Ст1, Ст2, Ст3	1050	10—16	0,1—0,12	250	Сопротивление коррозии во влажной атмосфере Жаростойкость
08, 08кп, 10, 10кп	1000	8—12	0,08—0,1	250	
<i>Высокоуглеродистая сталь</i>					
У7, 65Г	1000	4	0,06—0,08	1250	Высокая износостойкость и коррозионная стойкость Высокая износостойкость Высокая износостойкость штампов для холодной высадки
ШХ15, 85ХФ У10	1080	4	0,05—0,1	1550	
	1020	8—10	0,08—0,12	1400	
У12	1020	8—10	0,08—0,12	1500	Высокая износостойкость напильников и сверл
<i>Цементованная (предварительно) сталь</i>					
10, 15, 20Х	1000	6—8	0,05—0,08	1400	Высокая износостойкость и коррозионная стойкость деталей втулочно-роликовых цепей Высокое сопротивление абразивному изнашиванию
18ХГТ	1050	4—6	0,04—0,08	1450	
<i>Аустенитная сталь</i>					
12Х18Н10Т	1020	2—8	0,04—0,1	280	Высокая коррозионная стойкость и жаростойкость

насыщаются хлоридами хрома; во время насыщения при температуре 1000—1100°С хлориды выделяются из пор, диссоциируют и выделяют атомарный хром. Хромирование в жидкой среде осуществляется в ванне с расплавленными солями (BaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>, CaCl<sub>2</sub>); в расплав вводится 10—20% CrCl<sub>2</sub>. Над зеркалом ванны пропускается водород. В результате соответствующих реакций в ванне образуется CrCl<sub>3</sub>, который и выделяет атомарный хром. В табл. VIII.33 представлены режимы хромирования деталей из различных материалов.

Для повышения механических свойств хромированных деталей их подвергают термической обработке; иногда ее совмещают с охлаждением изделий после диффузионного насыщения хромом. Изменения размеров, происходящие в процессе хромирования, закономерны и могут быть учтены соответствующим припуском. Большей частью увеличение размеров составляет 0,01—0,03 мм на сторону.

## 7. Алитирование

Алитированием называется процесс диффузионного насыщения поверхности сталь-

ных изделий алюминием при температурах 750—1000°С в соответствующей среде. В результате алитирования существенно повышаются окалинстойкость и сопротивление атмосферной коррозии. Наиболее часто алитированию подвергают низкоуглеродистые стали. За счет длительной (2—12 ч) выдержки при температурах 750—1050°С в алюминийсодержащей среде формируется алитированный слой в пределах 0,02—0,8 мм.

На практике применяют алитирование в порошкообразных смесях, в ваннах с расплавленным алюминием, металлизацию стали алюминием с последующим диффузионным отжигом. Технологические особенности этих методов представлены в табл. VIII.34.

Алитированный слой состоит из твердого раствора алюминия в  $\alpha$ -железе. На поверхности возможно образование интерметаллических фаз. Диффузионный слой отделяется от сердцевины отчетливой линией раздела. Он обладает повышенной твердостью (HV400—500) и хрупкостью. Увеличение содержания в стали углерода и легирующих элементов тормозит диффузию алюминия. Повышенная окалинстойкость алитированной стали связана с образованием на поверхности тонкой прочной пленки оксида

Таблица VIII.34

Методы алитирования изделий из стали

Метод алитирования	Насыщающая среда	Температура, °C	Продолжительность выдержки, ч	Глубина слоя, мм	Примечание
В порошкообразных смесях	1) 49,5% порошка алюминия+49,5% $Al_2O_3$ +1% $NH_4Cl$ 2) 99% ферроалюминия+1% $NH_4Cl$ 3) 48% ферроалюминия+48% песка+4% $NH_4Cl$	950—1050	6—12*	0,25—0,6	Алитирование проводят в железных или нихромовых ящиках. Детали упаковывают, как при цементации в твердом карбюризаторе, смесь употребляют многократно (добавляют 10—15% свежей смеси)
В ваннах с расплавленным алюминием	Расплавленный алюминий+8—12% Fe (во избежание растворения деталей)	720—750	0,25—1*	0,1—0,3	На поверхности расплава рекомендуется создавать слой флюса (например, 40% $NaCl$ ; 40% $KCl$ ; 10% $Na_2AlF_6$ ; 10% $AlF_3$ ) для очистки деталей, лучшего удаления лишнего металла и уменьшения разъедания поверхности деталей
Металлизация с последующим отжигом	На поверхность детали наносят слой алюминия (0,7—1,2 мм), на который наносят обмазку (50% сербристого графита, 20% огнеупорной глины, 30% кварцевого песка, 10% жидкого стекла)	900—950	2—4	0,2—0,4	Толщина слоя обмазки 0,8—1,5 мм

\* Для уменьшения содержания алюминия в слое и снижения его хрупкости алитированные детали иногда отжигают при 950—1050° C в течение 4—5 ч. Глубина слоя при этом увеличивается на 20—40%.

алюминия  $Al_2O_3$ , предохраняющей изделие от дальнейшего быстрого окисления.

Показателен технологический процесс алитирования бетонодержателей, применяемый на металлургических заводах. При этом процессе отмечаются одновременно диффузия алюминия в изделие и обычное покрытие поверхности этим металлом. Бетонодержатели служат для усиления и поддержания огнеупорной массы, в которую зафурерованы глиссажные трубы нагревательных печей. Они представляют собой короткие полудилиндры (высотой менее 400 мм), к наружной поверхности которых приварены многочисленные шпильки. В процессе работы печи под воздействием высоких температур бетонодержатели быстро выходят из строя. Технологический процесс алитирования, осуществляемый для увеличения срока их службы, состоит из следующих последовательно выполняемых операций: обезжиривания, травления, промывки, декапирования, вновь промывки, просушки, собственно алитирования. Рассмотрим, как на практике осуществляются эти операции.

Обычно на поверхности заготовок, предназначенных для алитирования, имеются масляные пятна. Чтобы удалить их, изделия нагревают в печи до 400—450° C. Продолжительность выдержки при этой температуре 0,5 ч. Травление осуществляют в 15—20%-ном растворе серной кислоты при температуре 47° C. Продолжительность травления до полного снятия окалины 30—40 мин. После травления детали промывают в холодной проточной воде и протирают металлическими щетками для снятия шлака

и получения чистой поверхности.

Очищенные изделия загружают в декапировочную ванну, заполненную 6—10%-ным раствором соляной кислоты, и выдерживают в ней при комнатной температуре в течение 5—10 мин. Затем их вновь промывают в холодной проточной воде и направляют на офлюсовку. На поверхности изделий, поступающих на офлюсовку, не должно быть следов окалины и темных пятен. При обнаружении таких пятен их следует удалить металлической щеткой. Офлюсовку изделий осуществляют в 1%-ном растворе смеси хлористого бария и хлористого натрия (70%  $BaCl_2$  и 30%  $NaCl$ ) при температуре 90° C. Продолжительность процесса 10 мин. Офлюсованные детали просушивают в течение 10 мин и направляют в ванну для алитирования. Разрыв во времени между офлюсовкой и алитированием не должен превышать 40—50 мин.

Заключительная стадия процесса — собственно алитирование. Для его осуществления просушенные изделия партиями загружают в ванну с расплавленным алюминием. Флюсом на зеркале ванны служит смесь солей (70%  $BaCl_2$  и 30%  $NaCl$ ). Перед загрузкой изделий зеркало ванны очищают от флюса железной лопаткой. Температуру ванны поддерживают на уровне 750° C; продолжительность пребывания изделий в ванне 25—40 мин. По истечении этого времени изделия извлекают из ванны и укладывают на полу цеха на некотором расстоянии одно от другого (во избежание взаимного сваривания).

Для внедрения описанного процесса необ-

ходимо несложное оборудование: свинцовые ванны для травления и декапирования, жестяная ванна для офлюсовки и электропечь с чугунным тиглем для алитирования. Покрытию алюминием целесообразно подвергать не только указанные изделия, но и ряд других деталей нагревательных печей, работающих в аналогичных условиях: сопла горелок, глассажные трубы и др.

#### Библиографический список

- Бабад-Захряпин А. А., Кузнецов Г. Д.* Химико-термическая обработка в тлеющем разряде. М., Атомиздат, 1975. 176 с. с ил.
- Бельский Е. И.* Стойкость кузнечных штампов. Минск, «Наука и техника», 1975. 239 с. с ил.
- Ворошин Л. Г., Ляхович Л. С.* Борирование стали. М., «Металлургия», 1978. 239 с. с ил.
- Глухов В. П.* Боридные покрытия на железе и сталях. Киев, «Наукова думка», 1970. 208 с. с ил.
- Гудремон Э.* Специальные стали. Т. 1 и 2. М., «Металлургия», 1966. 952 и 676 с. с ил.
- Гуляев А. П.* Металловедение. М., «Металлургия», 1977. 647 с. с ил.
- Гуляев А. П.* Термическая обработка стали. М., Машгиз, 1960. 496 с. с ил.
- Гуревич Б. Г., Говизина Е. А.* Электролитное борирование стальных деталей. М., «Машиностроение», 1976. 72 с. с ил.
- Дербасов Н. М.* Повышение надежности и долговечности машин. М., «Недра», 1966. 167 с. с ил.
- Дубинин Г. Н.* Диффузионное хромирование сплавов. М., «Машиностроение», 1964. 451 с. с ил.
- Елизаветин М. А., Сатель Э. А.* Технологические способы повышения долговечности машин. М., «Машиностроение», 1969. 439 с. с ил.
- Козловский И. С.* Химико-термическая обработка шестерен. М., «Машиностроение», 1970. 232 с. с ил.
- Лахтин Ю. М., Коган Я. Д.* Азотирование стали. М., «Машиностроение», 1976. 256 с. с ил.
- Лахтин Ю. М., Леонтьева В. А.* Материаловедение. М., «Машиностроение», 1979. 511 с. с ил.
- Лахтин Ю. М.* Металловедение и термическая обработка металлов. М., «Металлургия», 1977. 407 с. с ил.
- Ляхович Л. С., Ворошин Л. Г.* Борирование стали. М., «Металлургия», 1967. 120 с. с ил.
- Марочник стали и сплавов.* М., НИИМАШ, 1971. 482 с. с ил.
- Материалы в машиностроении.* Справочник. Т. 2. Под ред. Е. П. Могилевского. М., «Машиностроение», 1967. 496 с. с ил.
- Минкевич А. Н.* Химико-термическая обработка металлов и сплавов. М., «Машиностроение», 1965. 491 с. с ил.
- Многокомпонентные диффузионные покрытия.* Минск, «Наука и техника», 1974. 288 с. с ил. Авт.: Л. С. Ляхович, Л. Т. Ворошин, Г. Г. Панич, Э. Д. Шербаков.
- Повышение стойкости кузнечного инструмента методами химико-термической обработки.* Минск, БелНИИТИ, 1973. 30 с. с ил. Авт.: Е. И. Бельский, Л. А. Бондарь, Б. С. Кухарев, Л. С. Ляхович.
- Самсонов Г. В., Серебрякова Т. И., Неронов В. А.* Бориды. М., Атомиздат, 1975. 375 с. с ил.
- Соркин Л. М.* Упрочнение деталей борированием. М., «Машиностроение», 1972. 64 с. с ил.
- Справочник машиностроителя.* Т. 6. Под ред. Э. А. Сателя. М., «Машиностроение», 1964. 540 с. с ил.
- Справочник металлста.* Т. 2. Под ред. А. Г. Рахштадта и В. А. Брострема. М., «Машиностроение», 1976. 718 с. с ил.
- Трахтенберг Б. Ф.* Стойкость штампов и пути ее повышения. Куйбышев, Куйбышевское книжное изд-во, 1964. 280 с. с ил.
- Тылкин М. А.* Повышение долговечности деталей металлургического оборудования. М., «Металлургия», 1971. 608 с. с ил.
- Штампы для горячего деформирования металлов и сплавов.* М., «Высшая школа», 1977. 496 с. с ил. Авт.: М. А. Тылкин, Д. И. Васильев, А. М. Рогалев и др.
- Юргенсон А. А.* Азотирование в энергомашиностроении. Свердловск — Москва, Машгиз, 1962. 131 с. с ил.

## Глава IX

### ПОВЕРХНОСТНАЯ ЗАКАЛКА ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ

#### 1. Сущность и способы индукционной закалки

Индукционная закалка изделий из стали при нагреве токами высокой и промышленной частоты широко применяется во многих

отраслях техники. За последнее десятилетие этот метод получил широкое распространение и в металлургии, в частности в ремонтно-механических цехах металлургических предприятий. Нагрев токами высокой