

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

Стойкость валков чистового холодного проката. М., «Машиностроение», 1964. 127 с. с ил. Авт.: Д. А. Драйгор, А. С. Венжега, М. Я. Белкин и др.

Технология тяжелого машиностроения. Под ред. С. И. Самойлова. М., «Машиностроение», 1967. 595 с. с ил.

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

Школьник Л. М., Шахов В. И. Технология и приспособления для упрочнения и отделки деталей накатыванием. М., «Машиностроение», 1964. 184 с. с ил.

Шнейдер Ю. Г. Инструмент для чистой обработки металлов давлением. М.—Л., «Машиностроение», 1971. 247 с. с ил.

Юдин Д. Л., Зобнин Н. П., Найш М. Н. Упрочнение пластическим деформированием крупномодульных зубчатых колес.—«Вестник машиностроения», 1970, № 1, с. 19—21 с ил.

## Глава XIII

### МЕТАЛЛИЗАЦИЯ РАСПЫЛЕНИЕМ

#### 1. Способы металлизации

Процесс металлизации распылением состоит в расплавлении напыляемого материала, распылении его струей сжатого воздуха или газа и осаждении на поверхности изделий путем удара и деформации частиц. В зависимости от применяемого источника тепла различают газовую, электродугую, высокочастотную и плазменную металлизацию. Напыляемый материал может применяться в виде проволоки, ленты или порошка.

Схема распылительных головок металлизаторов представлена на рис. XIII.1. Наибольшее распространение получили электродуговые металлизаторы проволочного типа (рис. XIII.1, а). Электрическая дуга горит между двумя электродами в потоке сжатого воздуха, который захватывает капли расплавленного металла, измельчает их и направляет на поверхность детали. Дуга получает постоянный или переменный ток от сварочных трансформаторов или от преобразователя постоянного тока. Электродуговые аппараты могут быть использо-

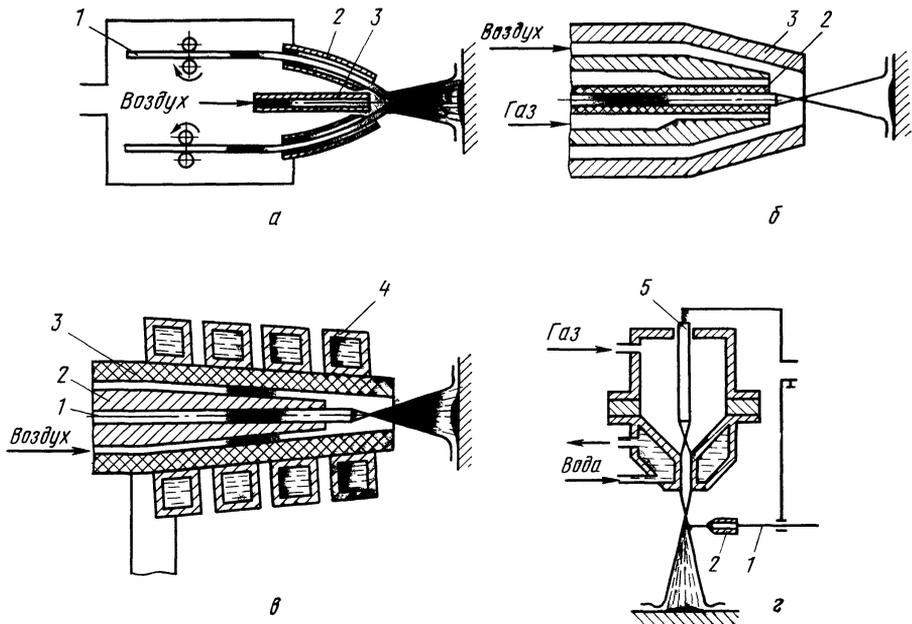


Рис. XIII.1. Схема распылительных головок электродугового (а), газового (б), высокочастотного (в) и плазменного (г) металлизаторов:

1 — распыляемая проволока; 2 — наконечники для проволоки; 3 — воздушное сопло; 4 — индуктор; 5 — вольфрамовый электрод

ваны для напыления материалов, температура плавления которых не превышает 2800°С, и применяются для напыления сталей и цветных металлов.

При газовой металлзации (рис. XIII 1, б) конец проволоки плавится в газовом пламени и частицы расплавленного металла увлекаются потоком сгоревших частиц. Попадая в струю сжатого воздуха, частицы металла дробятся и приобретают значительную скорость. Наиболее высокая температура (3180°С) достигается при использовании ацетилено-кислородного пламени. Газопламенная металлзация применяется для нанесения покрытий из керамики, тугоплавких соединений и металлов с особо высокой температурой плавления.

Разновидностью газовой металлзации являются «реактивная» и «взрывная» металлзации, а также металлзация с повышенным давлением горючего газа. В реактивных газовых металлзаторах плавление и распыление металла происходят в специальной камере, куда подаются пропано-кислородная смесь и напыляемый металл в виде порошка. В результате сгорания горючих газов из сопла камеры сгорания разряженных частицы металла вместе с продуктами сгорания вырываются наружу с большой скоростью (до 1600 м/с) и направляются на металлзируемую поверхность. Взрывная металлзация основана на использовании явления детонации (тепловой волны). Вращающийся барабан со звуконепропускаемым кожухом имеет камеру сгорания, куда порциями подаются порошок из карбида вольфрама, ацетилен и кислород. Взрывчатая смесь при определенном давлении воспламеняется электрической искрой. В результате воздействия тепловой волны и давления расширяющихся газов температура в камере сгорания повышается до 3300°С. При повороте барабана металлические частицы и горючая смесь со скоростью свыше 2700 м/с вырываются из камеры сгорания. Газы сгорают на воздухе, а металл оседает на поверхности детали в разряженном состоянии и связывается с основанием микросваркой. Толщина покрытия при этом способе металлзации составляет 0,05—0,2 мм.

Реактивную и взрывную металлзацию применяют для нанесения тугоплавких материалов с целью повышения износостойкости режущих и измерительных инструментов, рабочих поверхностей формовочных матриц и других деталей. Металлзация при помощи повышенного давления горючего газа также предназначена для распыления порошков твердых и керамических сплавов (оксидов алюминия и циркония). Здесь отсутствует сжатый воздух. Его роль выполняет горючий газ. Благодаря этому удается сохранить тепло металлических частиц и довести их до детали в разряженном состоянии. Частицы с основанием связываются микросваркой. В качестве горючего газа применяют водород или ацетилен. Вместо порошка можно использовать проволоку.

При высокочастотной металлзации (рис. XIII.1, в) расплавление напыляемого материала осуществляется в индукторе токами высокой частоты от установок типа ЛГПЗ-

30, ЛЗ-37 и др. Металл распыляют сжатым воздухом. Этот метод металлзации применяют в основном для напыления стали.

Процесс тигельной металлзации основан на распылении подогретым воздухом или газом предварительно расплавленного металла, поступающего в форсунку распылительного аппарата. Применение этого метода ограничивается возможностью нанесения только легкоплавких материалов, неудобством эксплуатации тигельных аппаратов, а также невозможностью выполнения потолочных работ.

Плазменное напыление (рис. XIII.1, г) является одним из новых прогрессивных способов металлзации распылением. В основе процесса лежат те же закономерности, что и при плазменной наплавке. Высокая температура плазменной струи позволяет производить распыление наиболее тугоплавких материалов. Применение плазмообразующих нейтральных газов предотвращает окисление напыляемых материалов в процессе нанесения. Плазменное напыление является высокопроизводительным процессом; так, производительность напыления вольфрама в виде проволоки достигает 12 кг/ч, в виде порошка 1,5 кг/ч при полезном использовании 60—70% металла.

## 2. Технология металлзации

Технологический процесс металлзации деталей распылением состоит из последовательного выполнения следующих операций: подготовки поверхности деталей к металлзации, собственно металлзации, механической обработки после металлзации и технического контроля металлзированных изделий.

*Подготовка поверхности.* Подготовка поверхности заключается в очистке ее от грязи, жиров, влаги, ржавчины и создании на ней соответствующей шероховатости. От загрязнений поверхность очищают промывкой в бензине или растворителях, пескоструйной обдувкой, проточкой на станках, обжигом в печах или нагревом газовой горелкой. Детали, бывшие в эксплуатации, особенно литые и чугунные, пропитанные маслом, не всегда удается очистить бензином и растворителями, поэтому их очищают нагревом до температуры 300—350°С в печах при помощи газовых горелок или паяльных ламп. Обжиг следует производить до полного выгорания масла и испарения влаги, т. е. до прекращения выделения дыма и пара. Характеристика и область применения основных способов подготовки поверхности перед металлзацией распылением представлены в табл. XIII.1, а их влияние на сцепляемость напыленного слоя с основным металлом — в табл. XIII.2.

Видно, что каждый из способов подготовки имеет свою область применения. Некоторые из них, например способ «рваной резьбы», насечка зубилом, анодно-механическая обработка, обеспечивают высокую прочность сцепления слоя с основанием, но значительно снижают усталостную прочность деталей машин. Их используют в тех

Т а б л и ц а XIII.1

Характеристики и области применения основных способов подготовки поверхности деталей под металлизацию

Наименование способа	Характеристика	Область применения
Пескоструйная обработка	Обдувка поверхности деталей из пистолета в специальной камере кварцевым песком с размером зерен 0,5—2,5 мм под избыточным давлением воздуха 1—6 ат	Для деталей сложной формы, при заделке трещин на чугунных деталях, для деталей с подвижной посадкой, а также при подготовке к нанесению жаропрочных и декоративных покрытий при толщине слоя от 0,02 до 3 мм
Нарезание «рваной» резьбы	После проточки с целью получения точности формы на токарном станке нарезают «рваную» резьбу с шагом 0,5—1,8 мм и глубиной 0,15—0,7 мм в зависимости от диаметра детали (минимальные цифры для диаметра 10—20 мм, максимальные для диаметра 200—400 мм). «Рваную» резьбу получают при установке реза в резцедержателе с вылетом 100—150 мм и смещении его ниже центра от 1 до 4 мм	Обеспечивает самую высокую сцепляемость и может применяться во всех случаях, где требуется высокая прочность сцепления при толщине покрытия от 0,5 до 20 мм. Недостаток способа — значительное снижение усталостной прочности деталей. Широко используется при ремонте валов и втулок из мягких сталей
Нарезание круглой резьбы с обкаткой	После проточки на токарном станке с помощью специального реза наносят ряд параллельных полукруглых канавок глубиной 0,6—0,7 мм, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга. Поверхность канавок обкатывают роликом для придания формы ласточкина хвоста. Вместо параллельных канавок допускается нарезание круглой резьбы с шагом 1,6 мм для стали и 1,8 мм для чугуна	При нанесении покрытий толщиной от 0,5 до 20 мм для восстановления размеров валов, обойм и других деталей из незакаленной и нецементированной стали. Может применяться для подготовки внутренних цилиндрических поверхностей
Насечка зубилом с последующей пескоструйной обработкой	Насечка зубилом (вручную или механически) рисунок с последующей пескоструйной обработкой	Наиболее часто применяется для плоских поверхностей незакаленных деталей, реже для цилиндрических деталей с толщиной покрытия 0,15—4 мм
Намотка проволоки с последующей пескоструйной обработкой	Проволоку диаметром 0,5—1,5 мм наматывают в один ряд с шагом намотки от 2 до 5 диаметров проволоки. После намотки и закрепления проволоки (с помощью сварки) производят пескоструйную обработку всей поверхности, подлежащей металлизации	Применяют для восстановления закаленных тяжело нагруженных деталей при толщине покрытия 0,7—20 мм. Диаметр проволоки должен быть меньше половины толщины слоя
Обдувка дробью	После обработки резанием производят обдувку детали стальной или чугунной дробью диаметром 0,5—2 мм. Дробь ударяется о поверхность детали со скоростью 50—70 м/с, осуществляет наклеп поверхности и придает ей шероховатость	Для обработки внутренних и наружных поверхностей любой формы. Усталостная прочность деталей при такой обработке не только не снижается, а даже несколько возрастает
Электродуговая обработка	Металлическим электродом с применением вибратора на поверхность детали наносится металл с высотой отдельных выступов 0,1—3 мм	Применяется для закаленных сталей, можно обрабатывать внутренние и наружные поверхности любой формы
Анодно-механическая обработка	Глубина язвин (шероховатость) 50—100 мкм. Процесс ведут на грубых обдирочных режимах по обычной схеме	То же, что и электродуговой, усталостная прочность снижается на 20—30%

Таблица XIII.2

Влияние способа подготовки основания и характера его материала на прочность сцепления

Способ подготовки поверхности	Прочность сцепления, кгс/мм <sup>2</sup> , при металле основания				
	сталь с твердостью HRC20—35	сталь с твердостью >HRC40	бронза	серый чугун	алюминий
Электроискровой (чистая поверхность)	3,1/0,9	2,4/0,7	1,4/0,5	3,1/0,9	1,4/0,5
Электроискровой (грубая поверхность)	6,3/1,9	6/1,5	1,4/0,8	6,3/1,9	1,7/0,6
Стальной крошкой (пескоструйным аппаратом при избыточном давлении 6 ат)	4,5/1,2	3,1/0,9	2,4/0,7	3,1/0,9	2,4/0,7
Нарезанием резьбы	6/1,5	1,4/1,5	4,5/1,2	6,3/1,9	1,7/0,6
Наложением промежуточного слоя из специального сплава	6/1,5	6,3/1,9	—/—	7/2,1	3,9/1,0

Примечание. Числитель — прочность на срез, знаменатель — прочность на отрыв.

случаях, когда нужно иметь большую прочность сцепления, или для подготовки деталей, не работающих при значительных знакопеременных нагрузках. К способам, повышающим усталостную прочность, относятся обработка дробью и пескоструйная обработка. На выбор способа подготовки поверхности оказывают влияние и характер термической обработки детали. Способы, связанные с резанием, применимы для незакаленных сталей.

**Металлизация.** Металлизацию производят с помощью стационарных или переносных металлизационных установок. Детали, имеющие цилиндрическую форму, наиболее часто подвергают металлизации на токарных станках. Обрабатываемые детали закрепляют в патроне или центрах, а металлизатор — на суппорте станка. Нанесение металлизационного слоя на плоские детали осуществляют в специальных камерах, снабженных

вытяжной вентиляцией. Техническая характеристика электродуговых металлизаторов представлена в табл. XIII.3, а газовых — в табл. XIII.4.

Для электродуговой металлизации чаще других применяют металлизаторы ЭМ-6, МЭС-1 (стационарные) и ЭМ-9 (переносной). Производительность стационарных металлизаторов достигает 14—15 кг/ч, а переносных — до 8 кг/ч. Электрометаллизатор ЭМ-6 предназначен для восстановления изношенных цилиндрических и плоских поверхностей деталей различных размеров, нанесения антикоррозионных покрытий, повышения жаростойкости и др. Металлизатор МЭС-1 изготовлен из узлов металлизатора ЭМ-6 и отличается от него тем, что предназначен только для металлизации шатунных и коренных шеек коленчатых валов. Распылитель головки повернут относительно корпуса на 90°, значительно сужен и выдвиг-

Таблица XIII.3

Техническая характеристика электродуговых металлизаторов

Параметры	Тип аппарата						
	ЛК-5	ЛК-6	ЭМ-3А	ЭМ-6	МЭС-1	ЭМ-9	УМА-1
Рабочее избыточное давление воздуха, ат	6	5,5—6	4,5—6	4—5	5—6	5—6	2,6—3
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /мин	1,2	0,45—1	0,8—1,0	0,8—0,9	0,7—0,9	0,8—1,0	0,4—0,5
Напряжение, В	25—35	25—35	25—30	30—35	30—35	30—35	35—40
Максимальный ток, А	180	180	300	500	400	300	200
Диаметр проволоки, мм	1,2—1,6	1,2—2	1—2	1,5—2,5	1,5—2,5	1,2—2	1,5—2,5
Максимальная скорость подачи проволоки, м/мин	2,1	4	2,4	2,8	4	4	3
Масса, кг	1,7	20	2,8	21	23,5	—	16
Производительность аппарата, кг/ч, при напылении:							
стали	2,5—3	2,5—3	1,8—2,5	12—15	12—14	5—6	7—12
железа	3—5	—	2,5—5	10—12	10—12	—	—
алюминия	1,8—2,2	—	0,8—1	3—4	3—4	—	—

Т а б л и ц а XIII.4

Техническая характеристика газовых металлизаторов

Параметры	Тип аппарата		
	ГИМ-1	ГИМ-2	МГ1-1
Рабочее избыточное давление, ат:			
сжатого воздуха . . . . .	4—5	3—5	3,5—4
кислорода . . . . .	2,5—3	2—5	2—7
ацетилена . . . . .	≥0,03	≥0,04	0,04—0,6
пропан-бутана . . . . .	—	0,03—0,04	0,1—0,5
нефтяного газа . . . . .	—	0,2—0,6	—
смешанного газа . . . . .	—	0,3—0,5	0,2—0,5
Расход газов:			
сжатого воздуха, м <sup>3</sup> /мин . . . . .	0,6—0,8	0,6—0,8	0,7
кислорода, л/ч . . . . .	250—350	900—1860	625—2100
ацетилена, л/ч . . . . .	250—350	300—600	240—840
пропан-бутана, л/ч . . . . .	—	180—360	150—435
нефтяного газа, л/ч . . . . .	—	340—860	—
смешанного газа, л/ч . . . . .	—	380—1040	450—1000
Диаметр проволоки, мм . . . . .	1,8—2,0	1,2—2,0	1,5—3,0
Масса, кг . . . . .	2,5	2,5	2,0

нут вперед на 200 мм. Токонесущие шины головки расположены вертикально. Минимальная длина шейки, которая может быть металлizzata этим аппаратом, составляет 20 мм.

Электродуговой металлизатор ЭМ-9 применяют для восстановления изношенных деталей, деталей с трещинами, для нанесения антикоррозионных и декоративных покрытий, устранения дефектов в отливках, повышения жаростойкости стальных деталей. Для нанесения псевдосплавов (сталемедных, медноцинковых, сталеалюминиевых и др.) применяют, кроме двухпроводных, трехпроводных электродуговые металлизаторы (например, электродуговой металлизатор УМА-1). При наличии такого металлизатора можно получить композиции псевдосплавов из одного, двух и трех разных металлов, а изменяя скорости подачи проволоки — и композиции с различным их соотношением.

Для высокочастотной металлзации чаще других применяют металлизатор типа МВЧ-2. При обработке деталей с помощью этого металлизатора обычно используют проволоку диаметром 4—5 мм и частоту тока 100—200 кГц. Для этого применяют лампы генераторы ЛЗ-37, ЛГПЗ-30, ЛГПЗ-60, ЛГ-60, ЛПЗ-67. При индукционном нагреве происходит послойное оплавление наружной поверхности проволоки; по мере продвижения проволока полностью расплавляется. При этом нагреве легко управлять температурным режимом, что приводит к минимальному выгоранию химических элементов и окислению проволоки. Сжатый воздух подают концентрично расплавляемой проволоке; поток струи воздуха и частиц металла получается практически ламинарным, без завихрений.

Для плазменного напыления тугоплавких материалов (вольфрама, оксида алюминия, боридов, карбидов) применяют установки типа УМП-1-61, УМП-2-62 и УМП-4-64. Установка УМП-1-61 рассчитана на исполь-

зование исходного материала в виде проволоки диаметром 1—1,5 мм. В установке УМП-2-62 применяют порошковые материалы. В более универсальной установке УМП-4-64 используют порошковые и проволочные исходные материалы. Наилучшие результаты получают при использовании в качестве плазмообразующего газа аргона, гелия или их смесей с водородом. Установка УМП-4-64 может работать также на азоте, но в этом случае требуются большие мощности источника тока. Рекомендуют мощности источника тока 30—40 кВт и расход газа 3—4 м<sup>3</sup>/ч. При помощи этой установки можно напылять наружные поверхности различной конфигурации, внутренние поверхности диаметром от 100 мм и выше; толщина напыленного слоя колеблется от 0,1 до 10 мм. В качестве источника тока могут быть использованы обычные преобразователи типа ПС-500 (один или два), соединенные последовательно, и полупроводниковые выпрямители типа ИПН-160/600 и ИПГ-500.

Для металлзации деталей распылением используют стальную проволоку марок 10, 15, 20, 25, 30, 40, 45, 50, У7, У8, У10, 12Х18Н10Т, 12Х18Н10 и др.; латунную марок Л62, Л68, ЛС59-1; бронзовую марок БрКМц3-1 и БрОЦ4-3; медную ММ, М1 и М2, цинковую, алюминиевую и др. Проволока должна быть чистой, без вмятин и неровностей. Очистку проволоки от масла осуществляют промывкой в бензине, а от окислы — пескоструйной обработкой.

Режимы металлзации не должны допускать нагрева металлзируемой поверхности выше 70—80°С. Покрытие деталей сталью марок У12, У10, У7, 50, 40 обычно производят при следующих режимах: расстояние от сопла до поверхности детали 75—100 мм, давление сжатого воздуха 6 ат, ток 70 А, рабочее напряжение 20—25 В. В табл. XIII.5 указаны режимы, рекомендуемые для электродуговой металлзации деталей различными материалами. С повышением ско-

Т а б л и ц а XIII.5

Режимы электродуговой металлизации деталей машин

Назначение металлизации	Напыляемый материал	Параметры режима металлизации						толщина слоя покрытия, мм
		окружная скорость вращения детали, м/мин	продольная подача металллизатора, мм/об	расстояние от сопла металлизатора до детали, мм	ток, А	напряжение, В	рабочее избыточное давление сжатого воздуха, ат	
Восстановление размеров чугуновых и стальных деталей	Сталь 08	8—15	1,2—2,5	75—150	50—175	20—35	4—6	2—5
Повышение износостойкости деталей	Стали 40 и У10	8—15	1,2—2,5	75—150	50—175	20—35	4—6	2—5
Нанесение антикоррозионного покрытия	Сталь 12Х18Н10Т	20	1—1,2	135	100—120	30—35	5—6	1,5—2
Нанесение жаростойкого покрытия	Алюминий	30	1,5—2	50—60	35—100	25	5,5—6	1,5—2
Устранение литейных пороков и уплотнение сварных швов	Цинк	15	1,2	40	60	25	6	1,5—2,5
Нанесение на подшипники антифрикционного покрытия	Биметалл свинец—алюминий	20	1,5—2	50—60	35—100	25—30	5,5—6	1,5—2

рости подачи проволоки стабильность горения дуги нарушается, возникают токи короткого замыкания, качество покрытия снижается. Поэтому при работе на переменном токе целесообразно использовать проволоку большего диаметра (2,5 мм), но вести процесс на пониженной скорости.

Режимы газовой металлизации, так же как и электродуговой, зависят от ряда факторов. В табл. XIII.6 приведены некоторые сведения о режимах газовой металлизации в зависимости от распыляемого материала и области ее применения.

Покрытия следует наносить при температуре детали не ниже 5—7°С; в противном случае вследствие конденсации паров воздуха на поверхности детали образуется влажная пленка, препятствующая прочному сцеплению напыленного слоя с основанием. Во время напыления некрупных деталей цилиндрической формы струю металла направляют перпендикулярно к их оси. При металлизации крупных деталей сначала напыляют бурты, галтели и кольцевые канавки, а затем заполняют профиль резьбы отдельно с каждой стороны. Заполняя шейки с галтелями и профиль резьбы, струю металла направляют под углом 45° к оси детали. После этого сплошным слоем покрывают всю поверхность; в этом случае струя напыляемого металла должна быть перпендикулярна оси детали. При непрерывно-последовательном способе металлизации цилиндрических деталей толщина  $h$  (см) покрытия, наносимого за один проход, может быть определена по формуле

$$h = (G - g) / vs\gamma,$$

где  $G$  — производительность аппарата, г/мин;

$g$  — потери металла, г/мин;

$v$  — окружная скорость детали, см/мин;

$s$  — подача аппарата вдоль оси, см/об;

$\gamma$  — плотность напыленного металла, г/см<sup>3</sup>.

При металлизации валов имеющиеся шпоночные канавки закрывают временными шпонками из твердых пород дерева или из стали. При металлизации внутренних поверхностей рекомендуется предварительный подогрев детали до 100—150°С, что улучшает сцепление напыленного слоя с основным металлом.

Напряжения, возникающие в слое металла при нагреве и охлаждении, увеличиваются с повышением толщины покрытия и с увеличением разницы в коэффициентах расширения металлов напыленного слоя и детали. Поэтому обычно стремятся подбирать для напыления металл, близкий по коэффициенту расширения к основному металлу детали.

*Механическая обработка.* Для получения требуемого размера детали и чистой поверхности после металлизации слой покрытия подвергают соответствующей обработке резанием, заключающейся обычно в обточке и шлифовании. Для прочного сцепления наносимого слоя с основным металлом и хорошей его работоспособности необходимо, чтобы после окончательной обработки напыленный слой имел толщину не менее

Т а б л и ц а XIII.6  
Режимы газовой металлизации

Назначение покрытия	Распыляемый материал	Расстояние от сопла до металлизирваемой поверхности, мм, при распылении		Вид пламени*3	Давление сжатого воздуха*4	Примечание
		ручными аппаратами*1)	механизированными аппаратами*2)			
Защита от коррозии	Алюминий, цинк, сплавы алюминия, нержавеющей сталь	80—150	150—250	Слегка восстановительное или нейтральное	Высокое	Для нержавеющей стали — нейтральное пламя
Металлизация валов для подвижных посадок	Сталь с содержанием 0,5—1% С	180—200	250—300	Нейтральное	Среднее до выскокого	—
Металлизация валов для неподвижных посадок	Сталь с содержанием 0,2—1% С	120—150	200—250	Нейтральное или окислительное	Низкое до выскокого	—
Металлизация двухслойных подшипников скольжения	Бронза и сплавы алюминия	100—150	180—250	Нейтральное	Среднее	Для бронзы — слегка окислительное пламя, для сплавов алюминия — слегка восстановительное
Зателка раковин в чугунах	Сталь с содержанием 0,1—1% С	100—150	200—250	Нейтральное или окислительное	Низкое до выскокого	—
Нанесение слоя молибдена	Молибден	80—130	200—300	10%-ное окислительное	Низкое	—
Металлизация дерева, картона, стекла, фарфора, пластмасс	Алюминий, цинк, олово	280—350	400—500	Нейтральное	Высокое	Учитывать длину факела пламени; стекло подогреть, полые фарфоровые детали охлаждать

\*1) Пронзводительность распыления 1—2,5 кг/ч.

\*2) Пронзводительность распыления 5—20 кг/ч.

\*3) Окислительное пламя — с избытком кислорода, восстановительное — с избытком горючего газа.

\*4) Давление сжатого воздуха: высокое > 4 ат, среднее 3—4 ат, низкое < 3 ат.

0,6 мм при диаметре детали до 25 мм и 0,95—1 мм при диаметре детали 150 мм и выше. В табл. XIII.7 указаны припуски на последующую обработку резанием цилиндрических поверхностей. Пользуясь этими данными и зная номинальный диаметр и величину износа, можно определить необходимую толщину слоя  $h_1$  (мм) по формуле

$$h_1 = (d_n - d_n) / 2 + b,$$

где  $d_n$  — номинальный диаметр детали, мм;

$d_n$  — диаметр детали после износа или после предварительной подготовки, мм;

$b$  — припуск на последующую обработку, мм.

Токарную обработку поверхностей, напыленных цинком, алюминием, медью, бронзой

и низкоуглеродистой сталью, выполняют проходными резцами с пластинками из твердого сплава ВК8, а поверхностей, напыленных среднеуглеродистой сталью, — резцами с пластинками из твердого сплава Т15К10. Режимы токарной обработки представлены в табл. XIII.8, а режимы шлифования — в табл. XIII.9.

Назначая режим обработки резанием, следует учитывать способ подготовки поверхности под металлизацию. Если поверхность подготовлена способом «рваной резьбы» или нарезанием круглых канавок, то усилие резания свыше 60 кгс не приводит к отслаиванию покрытий, в то время как у деталей, подготовленных пескоструйным способом, отслаивание происходит иногда уже при усилии резания 30 кгс. Поэтому во

Таблица XIII.7

Величина припусков на обточку и шлифование деталей после металлизации

Диаметр восстанавливаемой детали, мм	Припуск на диаметр, мм				Диаметр восстанавливаемой детали, мм	Припуск на диаметр, мм			
	токарная обработка с последующим шлифованием			обработка только шлифованием		токарная обработка с последующим шлифованием			обработка только шлифованием
	токарная обработка	шлифование	всего			токарная обработка	шлифование	всего	
25	0,8	0,4	1,2	0,6	125—150	1,6	0,6	2,2	0,9
25—50	1,0	0,4	1,4	0,7	150—200	1,8	0,7	2,5	1,0
50—75	1,1	0,4	1,5	0,7	200—300	2,1	0,9	3,0	1,4
75—100	1,3	0,4	1,7	0,8	300—500	2,3	1,1	3,4	1,7
100—125	1,4	0,5	1,9	0,8					

Таблица XIII.8

Режимы обработки металлизированных изделий на токарных станках

Материал напыленного слоя	Скорость резания, м/мин		Подача, мм/об		Глубина резания, мм
	черновая обточка	чистовая обточка	черновая обточка	чистовая обточка	
Сталь марок:					
10	22—30	22—30	0,15	0,07	0,4
25	16—22	16—22	0,10	0,07	0,4
50	12—15	12—15	0,10	0,07	0,4
У8	9—12	9—12	0,10	0,07	0,3
Цветные металлы и сплавы	35—45	35—45	0,15	0,08	0,5

Таблица XIII.9

Режимы шлифования металлизированной поверхности деталей

Параметры	Вид обработки	
	грубая	тонкая
Окружная скорость вращения шлифовального круга, м/с . . . . .	30—32	30—32
То же, изделия, м/мин . . . . .	10	10
Скорость продольной подачи стола, м/мин . . . . .	1,0—1,2	0,4
Глубина шлифования за один проход, мм . . . . .	0,025—0,030	Очень малая
Марка круга . . . . .	Э46ЭСМ2К	Э46ЭСМ2К
Охлаждающая среда . . . . .	Эмульсия	

втором случае следует уменьшить подачу и глубину резания, особенно при обработке тонких слоев. Повышение скорости резания мало влияет на отслаивание металлizationного слоя. При обработке поверхности, подготавливаемой анодно-механическим способом, облегчаются условия резания и уменьшается опасность отслаивания металлizationного слоя от основного металла.

Металлизированные детали для заполнения пор и повышения плотности покрытия иногда пропитывают специальными составами (лаками, красками). Для повышения прочности сцепления стальных покрытий с основанием рекомендуется проводить термическую обработку детали. Так, нагрев в печи до температуры 300—350° С с выдержкой в течение 1 ч повышает прочность сцепления в 1,3 раза. Однако в результате нагрева часто уменьшаются твердость и износостойкость покрытий.

*Контроль качества металлizationции.* Технический контроль осуществляют при подготовке поверхности деталей под металлizationцию, в процессе нанесения покрытия и после обработки резанием металлizationционного слоя. Основными показателями качественной металлizationции являются мелкозернистая структура напыленного металла и прочность сцепления металлizationционного слоя с основанием. Хорошо напыленный слой должен иметь вид тонкого наждачного полотна, без вздутий, трещин или других механических дефектов.

Проверка деталей после покрытия обычно сводится к замеру толщины слоя путем сравнения размеров детали до покрытия и после него, к проверке качества поверхности путем осмотра через лупу и сравнения с эталоном, к проверке прочности сцепления покрытия с основным металлом легким постукиванием деревянным молотком (в участках неплотного прилегания слоя к поверхности слышен дребезжащий звук).

### **3. Влияние технологических факторов на свойства металлizationционных покрытий**

К основным технологическим факторам, влияющим на качество металлizationционных покрытий, относятся: свойства и форма покрываемой поверхности и способ ее предварительной подготовки; свойства распыляемого металла; источник тепла для расплавления металла и тип аппарата; давление сжатого воздуха, газа, а также ток и напряжение; скорость подачи проволоки и аппарата; расстояние от зоны плавления до металлizationируемой поверхности; угол напыления; продолжительность металлizationции; температура напыляемой поверхности. Основными свойствами, зависящими от этих параметров, являются пористость, механические свойства, сопротивление износу, прочность сцепления с основным металлом, коррозионная стойкость.

*Пористость.* Металлizationционные слои обладают значительной пористостью. Для стальных покрытий ее величина достигает 8—14%. Поры могут быть закрытыми и при

небольшой толщине слоя сквозными, но и в том, и в другом случае пористость весьма резко сказывается на свойствах напыленного металла, его упругости, прочности, твердости, тепло- и электропроводности, тепловом расширении и др. В работе антифрикционных сплавов пористость играет существенную положительную роль — поры являются своеобразными резервуарами для смазки и тем самым создают условия для сохранения масляной пленки даже при тяжелой работе подшипника.

Пористость покрытий зависит от режима металлizationции. С увеличением расстояния до металлizationируемой поверхности свыше 75 мм пористость возрастает (табл. XIII.10), а с увеличением давления распыляющего воздуха (при прочих равных условиях) уменьшается. Электрические параметры процесса оказывают на пористость небольшое влияние.

Пористость зависит также от материала покрытия. Так, напыленный при одних и тех же условиях слой стали имеет пористость 10—14%, а слой алюминия 8—10%. Поэтому для обеспечения водонепроницаемости при давлении 1 кгс/мм<sup>2</sup> толщина металлizationционного слоя, напыленного сталью 40, должна быть 0,5 мм, а напыленного алюминием 0,23 мм.

Термическая обработка напыленного металла, связанная с изменениями в его строении, приводит к повышению плотности материалов вследствие ликвидации части пор и некоторого восстановления сплошности.

*Механические свойства.* Механические свойства (твердость, предел прочности и др.) напыленных металлов значительно отличаются от механических свойств исходных металлов: у них снижаются предел прочности, пластичность и повышается твердость. Это связано с характером сил сцепления частиц напыленного металла и теми изменениями в составе и строении, которые вызваны процессами интенсивного окисления частиц металла в процессе металлizationции, образованием новых фаз, неоднородностью и пористостью слоя. Механические свойства металлizationционных покрытий существенно зависят от параметров технологического процесса. Наиболее прочные и твердые слои формируются при давлении воздуха 6—7 ат и малых (порядка 80—100 мм) расстояниях от зоны плавления до металлizationируемой поверхности и токе 70 А.

При совместной работе металлizationционного покрытия с основным металлом сказывается ряд положительных особенностей, благоприятных в условиях циклических нагрузок. Металлizationционный слой способен высасывать пики напряжений в основном металле, что приводит к повышению сопротивления усталости. Появление трещины в напыленном слое не вызывает ощутимой концентрации напряжений. Вследствие значительно меньшей пластичности слоя по сравнению с основным металлом при их совместной работе до предела упругости слой берет на себя значительную долю общей нагрузки, а следовательно, подвергается разрыву в первую очередь. Тем не менее в большинстве случаев сопротивление уста-

Т а б л и ц а XIII.10

Зависимость физико-механических свойств металлизационного покрытия от расстояния между соплом и обрабатываемой поверхностью

Свойства	Расстояние от сопла до детали, мм					
	25	50	75	100	200	300
Прочность сцепления, кгс/мм <sup>2</sup> . . . . .	11	12	13	14	14	13
Содержание в металлизационном слое, %:						
металла . . . . .	92	90	85	82	70	55
оксидов . . . . .	8	10	15	18	30	45
*Общая пористость металлизационного слоя, % . . . . .	6,71	6,71	5,9	6,13	7,5	8,0
Твердость <i>HV</i> металлизационного слоя . . . . .	216	225	309	280	224	195
Предел прочности, кгс/мм <sup>2</sup> :						
при растяжении . . . . .	16	20	22	20	16	12
при сжатии . . . . .	151	145	120	102	85	57

лости деталей с металлизационным слоем ниже, чем у таких же деталей, но без металлизационного покрытия. Решающим фактором, определяющим сопротивление усталости, является способ подготовки поверхности. Ниже приведены данные, характеризующие влияние способа подготовки поверхности под металлизацию на предел выносливости  $\sigma_{-1}$  и коэффициент изменения предела выносливости  $\alpha_k$  стальных образцов:

	$\sigma_{-1}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\alpha_k$
Нарезание резьбы . . . . .	21	1,73
Нарезание круглой резьбы с последующей обкаткой . . . . .	18,9	1,52
Обработка стальной крошкой . . . . .	37,9	0,76
Электродной способ . . . . .	24,6	1,17
Полирование . . . . .	28,8	1,00

Сопротивление усталости увеличивается в том случае, если при подготовке к металлизации создаются наклеп и напряжения сжатия в поверхностном слое. Наименьшее снижение сопротивления усталости наблюдается при нанесении подслоя молибдена. При содержании углерода в электродной проволоке в пределах 0,8—1,2% и пескоструйной обработке сопротивление усталости снижается на 4—5%, а при содержании углерода в пределах 0,1—0,3% снижение предела выносливости достигает 10%. Уменьшение сопротивления усталости можно почти полностью устранить путем нагрева деталей до температуры 150—160°С и выдержки при этой температуре в течение 1 ч.

**Износостойкость.** Специфическое строение металлизационного слоя придает ему высокие антифрикционные свойства при работе со смазкой. Неоднородность строения, наличие на поверхности слоя развитой шероховатости, углублений и пор обеспечивают благоприятные условия для сохранения в процессе трения масляной пленки даже после прекращения подачи смазки. Известно, что шейки с металлизационным покрытием выдерживают значительно большие давления, чем шейки серийных колечных валов, выходящие из строя при удельном усилии свыше 75 кгс/см<sup>2</sup>, тогда как металлизиро-

ванные шейки продолжают работать при удельном усилии 200 кгс/см<sup>2</sup>.

Технологические параметры оказывают существенное влияние на износостойкость металлизационных слоев. С увеличением расстояния от зоны плавления до металлируемой поверхности в пределах 75—

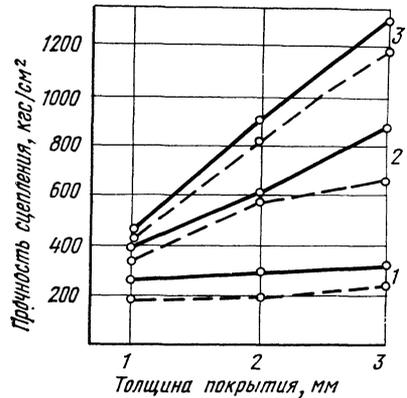


Рис. XIII.2. Изменение прочности сцепления в зависимости от толщины слоя и условий подготовки поверхности:

сплошные линии — газовая; штриховые — электродная металлизация; 1 — «рваная» резьба; 2 — электроподготовка; 3 — пескоструйная обработка

100 мм сопротивление износу возрастает. Износостойкость также возрастает с увеличением давления до 5—6 ат и с увеличением процентного содержания углерода в металлизационном слое. С увеличением расстояния от зоны плавления до поверхности детали свыше 100 мм, а также с увеличением силы тока, рабочего напряжения и нагрева поверхности детали в процессе металлизации износостойкость уменьшается.

**Коррозионная стойкость.** Металлизация позволяет наносить слои металлов, обладающих высокой коррозионной стойкостью, на детали из металлов, обладающих малой коррозионной стойкостью. Этим путем удастся защитить стальные детали машин и различные сооружения от коррозии. Следует проводить металлизацию металлом, наибо-

Т а б л и ц а XIII.11

Материалы для защитного напыления

Коррозионная среда	Материал покрытия	Толщина покрытия, мм
Атмосфера: не содержащая сернистых газов загрязненная дымовыми газами со следами сернистого газа содержащая сернистые газы	Цинк	0,08—0,1
	»	0,2
с повышенной влажностью и меняющейся температурой жаркого морского климата	Цинк с окраской	0,1
	Алюминий; алюминий с окраской	0,2; 0,12
Вода: пресная пресная 50 °С	Цинк и алюминий; цинк	0,1—0,2; 0,2
морская 50 °С	Цинк; цинк с окраской	0,1—0,2; 0,1
	Алюминий; сталь 12Х18Н9Т	0,15—0,25; 1,5—2,0
Водяной пар	Цинк; цинк с окраской; сталь 12Х18Н9Т с пропиткой	0,2—0,25; 0,15—0,20; 1,5—2,0
	Алюминий	0,2—0,3

лее стойким против коррозии в данных условиях эксплуатации, и обеспечивать мелкий распыл частиц, однородность структуры и меньшую пористость слоя. Так, цинковые металлизированные покрытия толщиной 0,1 мм в условиях незагрязненной атмосферы и воды обеспечивают защиту стальных конструкций в течение 30—40 лет. Алюминиевые покрытия успешно применяют для защиты металлов в атмосферных условиях, а также в атмосфере, содержащей сернистые газы, в аммиачных растворах и кислотах. Свинцовые покрытия применяют для защиты от коррозии в атмосферных условиях, а также в средах, содержащих серную, сернистую и фосфорную кислоты. Повышение коррозионной стойкости покрытий достигается уплотнением напыленного слоя механическими и химическими способами, а также пропиткой лаками, красками, различными полимерными составами. Рекомендуемые материалы для защитного напыления представлены в табл. XIII.11.

*Прочность сцепления напыленного слоя с основанием.* Под прочностью сцепления напыленного слоя с основанием понимают усилие, отнесенное к единице площади (в кгс/см<sup>2</sup> или кгс/мм<sup>2</sup>), необходимое для отрыва слоя от поверхности. Эта характеристика определяет возможность использования данного покрытия в соответствующих условиях эксплуатации.

Влияние различных факторов на прочность сцепления напыленного слоя с основа-

Т а б л и ц а XIII.12

Влияние напряжения электрической дуги на силу сцепления металлизированного слоя (сталь) с основанием (чугун)

Напряжение дуги, В	Усилие отрыва, кгс	Напряжение при разрыве, кгс/см <sup>2</sup>
20	380	121
25	340	97
30	580	166
35	430	116

нием показано на рис. XIII.2 и в табл. XIII.12—XIII.14. Прочность сцепления возрастает с уменьшением величины металлизационных частиц, улучшением очистки воздуха, уменьшением расстояния металлизированной поверхности от зоны плавления, увеличением степени шероховатости подготовленной к металлизации поверхности.

Прочность сцепления покрытия с основанием зависит также от химической природы металла основания и напыляемого металла, температуры металлизированной поверхности, технологии металлизации. Покрытия из легкоплавких металлов (цинк и др.) хорошо закрепляются на любой металлической поверхности и не требуют ее тщательной подготовки. Это их свойство часто используют для того, чтобы улучшить сцепляемость по-

Т а б л и ц а XIII.13

Зависимость прочности сцепления металлизированного слоя от тока и производительности металлизатора

Материал детали	Материал покрытия	Подача проволоки		Ток, А	Усилие отрыва, кгс	Напряжение, кгс/см <sup>2</sup>
		кг/ч	мм/мин			
Чугун	Бронза	0,5	660	35	360	103
»	»	1,0	1080	65	380	121
Сталь	»	1,5	1650	95	520	166

Т а б л и ц а XIII.14

Сила отрыва металлизированного слоя в зависимости от расстояния сопла металлизационного аппарата от поверхности обрабатываемой детали

Основной материал образца	Материал сопрягаемого образца и его поверхность	Площадь пластин, см <sup>2</sup>	Расстояние от сопла металлизатора до поверхности детали, мм	Сила сдвига, кгс	Напряжение сдвига, кгс/см <sup>2</sup>
Сталь	Сталь, гладкая	26,4	50	800	30,3
»	То же	25,85	100	2300	89,0
»	»	23,03	150	2240	97,3
Бронза	»	36,0	50	600	17,2
»	»	30,3	100	750	24,7
»	»	36,0	150	1020	28,4

П р и м е ч а н и е. Материал покрытия — цинк.

крытия с основанием. С этой целью на деталь первым слоем наносят цинк толщиной 0,05—0,1 мм, а затем уже слой других металлов. Покрытия из стали, бронзы и меди требуют тщательной подготовки поверхности. Прочность сцепления может быть повышена путем нанесения на поверхность детали подслоя (толщиной 0,2—0,3 мм) молибдена, придающего ей шероховатость. С увеличением содержания углерода в стальной проволоке, предназначенной для распыления, сцепляемость уменьшается. Подогрев металлируемой поверхности до 100°С ведет к увеличению прочности сцепления слоя с основанием.

Применение распыляющего воздуха давлением меньше 1 ат и больше 6 ат приводит к уменьшению прочности сцепления: в первом случае из-за увеличения размера частиц напыляемого металла и уменьшения их скорости, во втором — из-за отскакивания частиц от напыляемой поверхности. С увеличением расстояния от зоны плавления до напыляемой поверхности более 100 мм прочность сцепления снижается в результате уменьшения скорости и температуры частиц металла. Для получения оптимальной величины сцепления обычно работают при давлении воздуха 4—5 ат и расстоянии от зоны плавления до металлируемой поверхности детали 75—100 мм.

#### 4. Применение металлизации распылением

Металлизация распылением как способ восстановления размеров и упрочнения деталей машин имеет определенные преимущества и недостатки. К достоинствам металлизации относится возможность наращивания на шейки валов машин, станин станков и других деталей любого размера и конфигурации слоев металла толщиной до 15 мм с требуемыми физико-механическими свойствами. Это достигается применением соответствующих проволоки и режима обработки. За счет нанесения слоя металла со специальными свойствами можно существенно повысить износостойкость деталей, а также сообщить им соответствующие эксплуатационные свойства, например жаростойкость

и коррозионную стойкость. Кроме того, первоначальные свойства основного металла детали, сформировавшиеся при термической обработке, благодаря незначительному нагреву его в процессе напыления (не выше 100°С) практически не изменяются. Металлизация дает возможность получать на поверхности деталей псевдосплавы. Наконец, к достоинствам металлизации следует отнести сравнительную простоту и малую стоимость этого способа упрочнения. Основные недостатки металлизации распылением — хрупкость нанесенного слоя, не всегда достаточная прочность сцепления его с основным металлом, снижение прочности (особенно усталостной) деталей из-за уменьшения их размеров и нарушения целостности их рабочей поверхности при подготовке ее к металлизации, трудоемкость последующей обработки резанием металлизированных деталей, сравнительно большие потери металла при наращивании металлизацией распылением малых поверхностей.

Рассмотрим несколько примеров ремонта деталей машин методом металлизации распылением.

На Уральском заводе гидромашин металлизацию шеек вала диаметром 320 и длиной 980 мм производят проволокой из нержавеющей стали диаметром 1,5 мм при окружной скорости вала 20 м/мин, подаче металлизатора 1 мм/об, рабочем напряжении тока 30—35 В, токе 100—120 А. Расстояние от зоны плавления до металлируемой поверхности 135 мм, давление сжатого воздуха 4—5 ат. При этих условиях толщина слоя, наносимого за 1 проход, составляет 0,12 мм. На ряде электростанций было осуществлено восстановление шеек валов турбин большой мощности с помощью металлизации нержавеющей стали. В судостроительной практике шейки гребных валов диаметром 400—500 мм также восстанавливают металлизацией распылением нержавеющей стали.

Практика показывает, что восстановление изношенных деталей оборудования путем металлизации распылением позволяет не только повысить срок службы машин, но и существенно уменьшить трудоемкость ремонта. Так, на одном из заводов с целью центрирования передней и задней бабок то-

карных станков металлизационный слой наносят на изношенную поверхность основания подушки задней бабки, а затем производят шабрение. Этот способ снижает трудоемкость ремонта в 5—10 раз. Он состоит в замере величины износа подушки, подготовке поверхности пескоструйной обдувкой и нанесении слоя толщиной, равной величине износа плюс 0,2 мм на шабрение. Таким же способом восстанавливают соосность шпинделя передней бабки и гнезд револьверной головки, координат кареток токарных и револьверных станков и др. Для ремонта металлорежущих станков этим способом применяют калиброванную проволоку двух типов: латунь — алюминий и латунь — сталь. При электродуговой металлизации проволокой латунь — алюминий в один ручей аппарата вставляют проволоку Л62 диаметром 1,2 мм, в другой — алюминиевую диаметром 1,5 мм. Режимы металлизации в этом случае такие: давление сжатого воздуха 4—5 ат, напряжение тока 25 В, сила тока 50—60 А. Толщина слоя покрытия на плоских поверхностях не превышает 3 мм, а на цилиндрических не ограничивается. Лучшие результаты обеспечивает применение сплава латунь — сталь, обладающего высокими антифрикционными свойствами и хорошей обрабатываемостью напильником. Для распыления применяют проволоку из латуни марки Л62 и из стали марки 10 диаметром 1,2 мм.

Приведем неполный перечень деталей различного оборудования, подвергаемых металлизации распылением на ряде заводов:

1) восстановление геометрических размеров изношенных рабочих поверхностей чугунных и стальных деталей, имеющих форму тел вращения и работающих в условиях изнашивания трением при наличии смазки и статических нагрузках: трансмиссионные валы электромостовых кранов; передаточные валы всех размеров; распределительные кулачковые валы; коленчатые валы двигателей; валы компрессоров и роторов электродвигателей; валы редукторов прокатных станов и ножниц; шейки роликов рольгангов; барабаны; шпиндели токарно-винторезных станков; гильзы шпинделей радиально-сверлильных станков; оси и цапфы различного оборудования; вновь изготовленные детали, забракованные по размерам;

2) наращивание поверхностей под прессовую посадку: подступичные шейки чугуновозов, шлаковозов, мульдовых тележек, вагонных осей, различных тележек; гнезда под шариковые подшипники;

3) наращивание изношенных поверхностей плоских деталей: чугунные направляющие станин металлорежущих станков; направляющие кареток и салазок металлорежущих станков и других машин; плоские поверхности металлических моделей;

4) нанесение защитного слоя покрытия против коррозии для деталей, работающих в условиях воздействия коррозионной среды (воды, кислот, дыма): цилиндры компрессоров и насосов; плунжеры насосов; поршневые штоки; сальники; цилиндрические детали судов; шейки валов гидромашин;

5) нанесение антифрикционного слоя покрытия (взамен высокооловянистых бронз и баббитов): вкладыши крупных и средних подшипников различного оборудования;

6) нанесение жароупорного слоя покрытия для деталей, работающих в условиях воздействия высоких температур: хоботы завалочных машин мартеновских цехов; поддоны изложниц; кольца и языки шиберов горячего дутья доменных печей; электроигли; цементационные ящики; корпуса термопар;

7) устранение дефектов (пористость, раковины) черного и цветного литья, а также течи сварных швов отливок и сосудов, работающих под давлением до 60 ат: блоки и картеры двигателей; корпуса и кожухи насосов; цилиндры компрессоров; крышки электродвигателей; литые автомобильных двигателей; радиаторы отопления.

#### Библиографический список

*Елизаветин М. А.* Повышение надежности машин. М., «Машиностроение», 1968. 267 с. с ил.

*Елизаветин М. А., Сателъ Э. А.* Технологические способы повышения долговечности машин. М., «Машиностроение», 1964. 439 с. с ил.

*Кутьков А. А.* Износостойкие и антифрикционные покрытия. М., «Машиностроение», 1976. 152 с. с ил.

Методы повышения долговечности деталей машин. М., «Машиностроение», 1971. 272 с. с ил. Авт.: В. Н. Ткачев, Б. М. Фиштейн, В. Д. Власенко, В. А. Уланов.

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

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