

Министерство образования и науки Российской Федерации
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

С.В. Михайлицын
А.И. Беляев

**Пластическое деформирование, наплавка,
напыление и плакирование для восстановления
и упрочнения деталей машин**

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

Магнитогорск
2013

Рецензенты:

Декан факультета экономики и маркетинга ФГБОУ ВПО
«Магнитогорский государственный университет», профессор,
доктор педагогических наук, кандидат технических наук

Е.В. Романов

Первый заместитель директора – главный инженер

ЗАО «УралСпецМаш»

В.Д. Тулуш

Михайлицын, С.В.

Пластическое деформирование, наплавка, напыление и плакирование для восстановления и упрочнения деталей машин: учеб. пособие / С.В. Михайлицын, А.И. Беляев. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. – 179 с.

ISBN 978-5-9967-0386-9

Знакомит с современными теоретическими и практическими способами восстановления и упрочнения деталей машин и механизмов методами поверхностного пластического деформирования (ППД) под действием давления, наплавки, напыления и плакирования. В пособии даны принципы выбора упрочняющих технологий и материалов, характера разрушения и величины износа технологического оборудования и инструмента. Представлены типы наплавочных и напыляемых материалов, методы их расчёта, изготовления и рационального применения. Показаны области рационального проектирования технологий современных методов восстановления и упрочнения быстроизнашивающихся деталей машин и оборудования. Подробно изложены процессы формирования упрочнённого поверхностного слоя методом ППД различным инструментом.

Пособие предназначено для студентов университета, изучающих дисциплину «Восстановление и упрочнение деталей машин», по подготовке инженеров по специальности «Металлургические машины и оборудование» по направлению «Технологические машины и оборудование», бакалавров по направлению «Технологические машины и оборудование», инженеров по специальности «Оборудование и технология сварочного производства» по направлению «Машиностроительные технологии и оборудование», бакалавров по профилю «Оборудование и технология сварочного производства» по направлению «Машиностроение». Пособие полезно для молодых специалистов и изобретателей, ученых и людей, решающих творческие задачи.

УДК 621.791

ISBN 978-5-9967-0386-9

© Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2013

© Михайлицын С.В., Беляев А.И., 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Цель и задачи изучаемого курса. История развития теории и практики восстановления быстроизнашивающихся деталей оборудования	5
2. Условия работы и характер износа деталей оборудования и технологического инструмента. Виды изнашивания	9
3. Классификация и сущность способов восстановления и упрочнения рабочих поверхностей. Выбор состава и свойств упрочняющих покрытий. Области применения	16
4. Современные наплавочные материалы. Материалы для восстановительной и износостойкой наплавки. Коррозионно-стойкие наплавочные материалы. Характеристика, свойства и области применения.....	29
5. Теоретические основы наплавки. Основной металл. Свариваемость основного металла. Роль среды при наплавке. Погонная энергия и скорость охлаждения. Режимы наплавки. Доля основного металла в металле наплавки. Термообработка после наплавки.....	60
6. Общая характеристика технологии напыления. Практика напыления. способы напыления, их сущность. Напыляемые материалы. Прочность сцепления покрытия с основным материалом и между собой. Пористость и плотность покрытия. Термообработка после нанесения покрытия	76
7. Технология восстановления и упрочнения наплавкой и напылением деталей металлургического и горнорудного оборудования	110
8. Упрочнение деталей машин поверхностным пластическим деформированием (ППД). Формирование упрочнённого слоя деталей методом ППД. Остаточные напряжения и связь состояния поверхности с эксплуатационными свойствами деталей	127
9. Оборудование и технология для ППД (обкатывание, выглаживание, ультразвуковая обработка, чеканка, упрочнение проволочным инструментом, обработка дробью и др.).....	139
10. Дефекты наплавки и напыления. Причины образования и методы их обнаружения.....	154
Заключение.....	176
Вопросы самоконтроля для студентов.....	177
Библиографический список	179

ВВЕДЕНИЕ

Целью преподавания дисциплины «Восстановление и упрочнение деталей машин» является приобретение студентами знаний и практических навыков по теоретическим и технологическим основам упрочнения и восстановления деталей машин и механизмов.

В результате изучения дисциплины студент должен знать:

- принципы выбора упрочняющих технологий и материалов исходя из условий работы, характера разрушения и величины износа инструмента и технологического оборудования;
- типы наплавочных и напыляемых материалов, методы их расчёта, изготовления и рационального применения;
- области рационального проектирования технологий восстановления и упрочнения;
- современные методы восстановления и упрочнения быстроизнашивающихся деталей машин и оборудования;
- формирование упрочненного поверхностного слоя деталей методом поверхностного пластического деформирования (ППД).

При овладении знаниями по курсу «Восстановление и упрочнение деталей машин» необходимо использовать знания, полученные при изучении других дисциплин и курсов:

- материаловедения (кристаллизация, пластическая деформация и механические свойства, фазовые превращения, термическая обработка);
- основы теории трения и изнашивания (трибологические системы, фрикционное взаимодействие твердых тел);
- основы сварочного производства (металлургические процессы при наплавке, напряжения и деформации, тепловые процессы).

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИЗУЧАЕМОГО КУРСА. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ БЫСТРОИЗНАШИВАЮЩИХСЯ ДЕТАЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ

1.1. Цель и задачи изучаемого курса

Повышение надёжности – одна из важнейших проблем современности, которая возникает всегда, когда требуется обеспечить высокую эффективность работы систем, гарантированные сроки службы, безопасность обслуживания, является резервом снижения материалоемкости за счёт сокращения расхода материалов на запасные части и ремонт.

Одним из основных условий, которому должно удовлетворять оборудование, является его безотказная работа с необходимой надёжностью в соответствии с техническими условиями эксплуатации в течение заданного времени, особенно это важно для металлургического оборудования, у которого весьма низкие показатели по эксплуатационной надёжности и долговечности.

Мероприятия по повышению эксплуатационной надёжности и долговечности машин можно квалифицировать следующим образом:

- конструкторские мероприятия (изменение конструкции, применение дополнительных устройств, улучшение материалов, улучшение смазки);
- технологические мероприятия (поверхностная пластическая деформация – наклёп, термическая обработка, химико-термическая обработка, наплавка и напыление, гальваническое нанесение покрытий);
- организационные мероприятия (уход, профилактика, обслуживание).

Задача обеспечения радикального повышения износостойкости, жаропрочности, коррозионной стойкости, твёрдости и других важных свойств поверхности материалов деталей и механизмов машин может быть успешно решена применением наплавки и напыления как способов поверхностного упрочнения материалов.

При изучении дисциплины «Восстановление и упрочнение деталей машин» основной задачей является получение следующих знаний:

- принципы выбора упрочняющих технологий и материалов исходя из условий работы, характера разрушений и величины износа инструмента технологического оборудования;
- типы наплавочных и напыляемых материалов, методы их расчёта, изготовления и рационального применения;
- области рационального проектирования технологий восстановления и упрочнения;
- современные методы восстановления и упрочнения быстроизнашивающихся деталей машин и оборудования;
- формирование упрочнённого поверхностного слоя деталей методом поверхностного пластического деформирования (ППД).

1.2. История развития теории и практики восстановления и упрочнения быстроизнашивающихся деталей оборудования

Первым по времени возникновения видом электрической сварки плавлением является дуговая сварка металлов, созданная в 1882 г. русским изобретателем Николаем Николаевичем Бенардосом (1842–1905 гг.). Он использовал идею русского физика Василия Владимировича Петрова (1761–1834 гг.), который ещё в 1802 г. (за 7 лет до английского физика Деви) открыл явление электрической дуги и указал на возможность её применения для плавления металла. Основное внимание Н.Н. Бенардос сосредоточил на разработке способа сварки неплавящимся угольным электродом, применив его, главным образом, для наплавочных и ремонтных работ.

В конце XIX века русский инженер Николай Гаврилович Славянов (1854–1897 гг.) довёл до промышленного применения сварку плавящимся стальным электродом, разработал принципы защиты зоны сварки от вредного влияния азота и кислорода воздуха.

Серьёзным стимулом дальнейшего развития дуговой сварки плавящимся электродом явилась разработка шведским инженером О. Кельбергом в 1907 г. способа стабилизации дугового разряда и защиты зоны сварки от окружающего воздуха за счёт специальных веществ, наносимых на поверхность электродного стержня в виде покрытия. Это обеспечило резкое повышение качества сварных соединений. В 1917 г. американские инженеры О. Андрус и Д. Стрес изобрели электрод, стержень которого обёрнут бумагой (полоской), приклеенной жидким натриевым стеклом (канторским клеем). При сгорании бумаги образовывались газ и дым, улучшавшие защиту зоны сварки. Присутствие в дуговом разряде ионов натрия повышало стабильность горения дуги. Это и другие технические усовершенствования привели к появлению в 1928 г. на мировом рынке толстопокрытых электродов. С тех пор ручная дуговая сварка и наплавка покрытыми электродами является ведущим способом сварки и наплавки плавлением.

Появление технологии наплавки относится к 1896 г., когда Спенсер получил патент на изобретение, но промышленное применение началось позже. В 1922 г. братья Студи впервые осуществили в США наплавку коронок нефтяного бура способом газовой сварки с использованием присадочного материала в виде стальной трубки, заполненной хромовым сплавом. Примерно в это же время была осуществлена наплавка клапанов двигателей внутреннего сгорания с помощью сплава – стеллита (кобальтохромовольфрамового сплава). Первое время для наплавки использовали газовую сварку, но впоследствии по мере развития технологии сварки стали использовать и другие способы.

В конце тридцатых годов XX века широкое развитие в нашей стране получила автоматическая дуговая сварка, когда советским учёным Евге-

нием Оскаровичем Патонем (1870–1953 гг.) и руководимым им коллективом Института электросварки АН УССР была фундаментально разработана автоматическая сварка и наплавка под флюсом. Это потребовало разработки и организации производства различных флюсов как плавляемых, так и керамических.

В конце 40-х годов XX века получил промышленное применение способ сварки и наплавки в защитных газах, когда были изысканы пригодные для массового применения газы (гелий и аргон в США, углекислый газ – в СССР): ручная – неплавящимся электродом, механизированная и автоматическая – неплавящимся и плавящимся электродами. В 1950–1952 гг. в ЦНИИТмаше при участии МВТУ им. Баумана и ИЭС им. Е.О. Патона была разработана сварка низкоуглеродистых и низколегированных сталей в среде углекислого газа – процесс высокопроизводительный и обеспечивающий хорошее качество сварных соединений. Способы сварки и наплавки в среде защитных газов с использованием инертного газа аргона и неплавящегося вольфрамового электрода или дешёвого углекислого газа в сочетании с плавящимся электродом (легированной проволоки) заменяют сварку и наплавку под флюсом. Это эффективно в тех случаях, когда необходимо видеть дугу и управлять её перемещением или когда затруднена подача флюса к месту сварки или наплавки (например, потолочное положение).

В эти же годы французскими учёными был разработан новый вид электрической сварки плавлением, получивший название электронно-лучевой сварки. Источником теплоты для плавления металла является концентрированный поток электронов в вакууме. Электронно-лучевая сварка находит применение при соединении тугоплавких, химически активных металлов и сплавов, в том числе специальных сталей.

В 1949 г. разработан принципиально новый вид сварки плавлением, получивший название электрошлаковой сварки. При этом источником нагрева служит тепло, выделяющееся в расплавленной шлаковой ванне при прохождении через неё электрического тока от электрода к изделию. Он позволил решить вопрос качественной и высокопроизводительной сварки металла практически неограниченной толщины и механизации сварки вертикальных швов. На основе электрошлакового процесса создан новый способ получения металлов и сплавов с особыми свойствами, получивший название электрошлакового переплава.

В начале 50-х годов XX века была разработана порошковая проволока, представляющая собой трубчатую или сложного сечения проволоку, заполненную порошкообразным наполнителем, по составу близким покрытию сварочного электрода, с отношением его массы к массе металлической оболочки в пределах 15–40%. Порошковая проволока позволяет создавать газовую и шлаковую защиту металла сварочной ванны от воздуха, обеспечивать легирование металла шва и его очистку от вредных

примесей. Порошковая проволока – универсальный сварочный и наплавочный материал, пригодный для сварки сталей практически любого легирования, а также для наплавки слоёв с особыми свойствами. В некоторых случаях порошковые проволоки применяют с дополнительной защитой (флюсом или углекислым газом).

Дуговая наплавка развивалась гораздо медленнее сварки. Хотя ручная наплавка открытой дугой известна с 20-х годов прошлого столетия, её промышленному применению препятствовали некоторые недостатки, присущие этому способу: низкая производительность, тяжёлые условия труда и, самое главное, обилие различных дефектов в наплавленном слое.

Наплавка под флюсом свободна от перечисленных недостатков. В 40-е годы XX века в ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР были разработаны специальные флюсы, электродные проволоки и ленты, способы предупреждения металлургических пороков в наплавленном слое, методы получения наплавленного металла заданного химического состава, аппараты, установки и станки для механизированной наплавки разнообразных изделий. Большие работы по созданию и усовершенствованию методов механизированной наплавки были выполнены ЦНИИМПС, в Киевском, Уральском и Челябинском политехнических институтах.

Сравнительно просто осуществима наплавка легированной стали, если из неё можно изготовить проволоку. Однако из многих сплавов, отличающихся твёрдостью и малой пластичностью, невозможно изготовить проволоку. В таких случаях плавящимся электродом служит порошковая проволока. Размолотые ферросплавы и легирующие материалы, попадая в дугу, сплавляются с оболочкой из свёрнутой стали, и получается однородный сплав требуемого химического состава. Этот способ широко применяется для наплавки высоколегированных сталей и сплавов. Порошковая проволока с внутренней защитой (самозащитная) содержит в шихте сердечника минералы и газообразующие вещества вместе с легирующими материалами. В процессе плавления проволоки с внутренней защитой образуются небольшое количество шлака и защитный газ, что позволяет обойтись без дополнительных защитных средств.

В начале XX столетия разработано напыление, представляющее собой процесс нанесения покрытия на поверхность детали с помощью высокотемпературной скоростной струи, содержащей частицы порошка или капли расплавленного материала, осаждающиеся на основной металл при ударном столкновении с его поверхностью.

Первоначально напыление покрытий осуществляли истекающей из сопла горелки струи воздуха или нагретого газа, обеспечивающей мелкое распыление расплавленного металла и его осаждение на поверхность изделия. Этот способ впоследствии развился в технологию распыления жидких расплавов, широко используемую в современной порошковой металлургии. Первая установка для напыления, созданная в 1910 г. Шоо-

пом (Швейцария), была предназначена для нанесения на поверхность изделия покрытия из расплавленного металла, имеющего низкую температуру плавления, с помощью струи горячего сжатого воздуха.

Современную технологию напыления, в зависимости от применяемого источника тепловой энергии, можно разделить на два основных вида:

- газопламенное напыление (для нанесения покрытия из керамических тугоплавких материалов), при котором используется теплота, выделяющаяся при сгорании смеси горячего газа с кислородом;

- электрическое напыление (дуговая металлизация, способ электроимпульсного нанесения покрытий), основанное на использовании теплоты, выделяющейся при горении электрической дуги.

2. УСЛОВИЯ РАБОТЫ И ХАРАКТЕР ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА. ВИДЫ ИЗНАШИВАНИЯ

2.1. Условия работы и характер износа деталей оборудования и технологического инструмента

Детали и узлы оборудования, подвергающиеся в процессе эксплуатации воздействию нагрузок и других факторов, *изнашиваются и разрушаются*.

Отказы деталей оборудования можно квалифицировать по их разрушению:

1) *Разрушения от статических нагрузок*. Под статическими нагрузками понимаются однократные или малоповторяющиеся нагрузки, когда усталостное разрушение не успевает развиваться:

- пластические деформации возникают при перегрузке деталей из пластичных металлов. При этом появляется отклонение формы детали от первоначальной (удлинение, изгиб, вмятины и т.д.);

- вязкий излом – разрушение детали, которому предшествует значительная пластическая деформация;

- хрупкий излом – разрушение детали, которому не предшествует пластическая деформация (низкая температура, большое остаточное напряжение, ударная нагрузка на детали из малоэластичных материалов при большой концентрации напряжений, тепловое охрупчивание);

- ползучесть – процесс медленного непрерывного нарастания пластической деформации при длительном статическом нагружении.

2) *Разрушение от переменных нагрузок*. Под переменными следует понимать изменяющиеся во времени с определённой частотой нагрузки, которые приводят к усталостному излому:

- усталостный излом – это разрушение детали в результате действия переменных напряжений, превышающих предел выносливости σ_{-1} , но по величине не превосходящих предел текучести σ_T материала;
- разрушение от действия упругопластических деформаций (малоцикловая усталость) происходит при переменных напряжениях, превышающих предел текучести (малоцикловое нагружение при числе циклов $N = 1 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^4$);
- разрушение из-за усталостного выкрашивания происходит в результате возникновения на контактных поверхностях циклических напряжений сжатия (появляются углубления, превращающиеся в раковины);
- разрушения из-за коррозионной усталости возникают в результате совместного действия переменных напряжений и коррозионно-активной среды (возникают трещины внутри кристаллических решёток);
- разрушения из-за термической усталости возникают при длительном воздействии циклически изменяющихся тепловых напряжений;
- эрозийный износ является результатом механического ударного воздействия на поверхность детали жидких и твёрдых частиц, движущихся с большой скоростью и обладающих запасом кинетической энергии, или при воздействии волн кавитационного происхождения (часто с процессом коррозии);
- кавитационный износ – хрупкое разрушение поверхностей деталей в результате гидравлических ударов;
- коррозия металлов и сплавов представляет собой их разрушение в результате химического или электрохимического действия среды (атмосферная, электрохимическая и газовая или химическая) – разрушение всегда начинается с поверхности детали;
- коррозионное растрескивание поверхности – один из опасных видов коррозионного разрушения возникает при одновременном действии коррозионной среды и статических или повторно-статических нагрузок.

2.1.1. Причины разрушения деталей

Разрушения происходят вследствие возникновения опасных перегрузок, вызванных недостатками конструкции детали, дефектами технологии её изготовления либо неправильно выбранными запасами прочности. Нередки случаи поломок вследствие неправильной эксплуатации, когда агрегаты работают со значительными вибрациями и перегрузками, в результате чего детали подвергаются локальному нагреву, вызывающему возникновение внутренних напряжений; эти напряжения суммируются с действующими переменными напряжениями и способствуют неожиданному поломкам.

О характере поломки в определённой мере можно судить по излому детали, поскольку вид излома позволяет оценить имеющиеся в детали концентраторы напряжений и характер действующих сил.

Наиболее часто встречаются хрупкие изломы, на поверхности которых отсутствуют видимые следы пластической деформации. Хрупкие изломы могут возникнуть под действием многих факторов как в процессе изготовления (флокены, закалочные и сварочные трещины, хрупкие трещины, образовавшиеся в процессе травления и контакта с расплавленными и раскисленными металлами и др.), так и при эксплуатации деталей. Наличие надреза или другого концентратора напряжений, образование тонкого поверхностного хрупкого слоя может привести к хрупкому разрушению детали. Наиболее типичным видом излома являются изломы от многократно повторяющейся нагрузки, т.е. усталостные изломы.

2.1.2. Виды внешнего трения, вызывающие отказы деталей по износу

Трение проявляется при механическом контакте и движении контактирующих тел. Внешнее трение способствует проявлению различных видов сложного взаимодействия, при котором протекают механические, физико-химические, электрические и другие процессы. Основной характеристикой внешнего трения является сила трения – реакция, препятствующая взаимному перемещению.

Сила сопротивления относительно перемещению твёрдых тел, направленная противоположно этому перемещению, называется силой трения.

Различают следующие виды трения:

– *трение без смазки (сухое трение)* – трение при отсутствии введённых смазочных веществ на трущихся поверхностях, предусматривается в сухих муфтах и тормозах, ремённых передачах, сухих фрикционных передачах, в соединениях с гарантированным натягом с обезжиренными поверхностями (сборка с охлаждением);

– *полусухое трение* – смешанное трение, при котором на отдельных участках возникает граничное трение, а по остальной части площади контакта – сухое трение, характерное для соединений с натягом, резьбовых соединений, поверхностей зажима изделий;

– *граничное трение* – трение в условиях тонких слоёв смазки ($\leq 0,1$ мкм), когда смазка обладает свойствами, отличными от объёмных (масла с присадками для направляющих и подшипников с малыми скоростями);

– *полужидкостное трение* – смешанное трение, сочетающее в себе жидкостное и граничное трение или жидкостное сухое трение, при полужидкостном трении часть нагрузки воспринимается гидродинамическими силами в масляных слоях, а другая часть передаётся через граничную плёнку или непосредственно;

– *жидкостное гидродинамическое трение*, при котором масло увлекается в сужающийся между трущимися поверхностями зазор и создаёт гидродинамическое давление, полностью уравнивающее внешнюю нагрузку, возникает в подшипниках и направляющих при достаточной

скорости. Режим обладает саморегулированием – при повышении температуры понижается вязкость масла и понижается теплообразование в подшипнике;

– *жидкостное гидростатическое трение*, для обеспечения которого масло, разделяющее трущиеся поверхности, подаётся от отдельного насоса (применяется при малых скоростях, недостаточных для создания гидродинамического трения);

– *жидкостное контактно-гидродинамическое трение* при качении или качении со скольжением возникает в зубчатых и червячных передачах, роликоподшипниках (контактные деформации изменяют форму зазора, а высокое давление в масле приводит к резкому изменению его вязкости);

– трение в условиях *вязкопластической (консистентной) смазки* применяют в узлах трения скольжения при периодической работе и трудности применения жидкой смазки и широко – в узлах трения качения;

– трение в условиях *газовой (воздушной) смазки* применяют в быстроходных подшипниках (характеризуется минимальными сопротивлениями вращению и малым теплообразованием, нечувствительностью к изменению температуры);

– *трение в условиях вакуума, низких и высоких температур* – применение жидкой смазки в этих условиях невозможно. В связи с отсутствием теплоотвода, конвекцией воздуха и жидкости и с повышенным коэффициентом трения образование защитных оксидных плёнок в условиях вакуума замедленное. Применяют твёрдые смазки, самосмазывающиеся материалы, плёночные металлические покрытия.

2.2. Виды изнашивания

Изнашивание материалов – это процесс разрушения поверхностных слоёв при трении, который приводит к постепенному изменению размеров тел в направлении, перпендикулярном к поверхности трения. Интенсивность изнашивания пар трения зависит от свойств материалов деталей, технологической подготовки поверхностей и их качества, а также от условий службы – нагрузки, температуры, смазки и др.

Износ – результат процесса изнашивания. Все виды изнашивания делятся на три группы:

– *механическое изнашивание* (абразивное, усталостное) – происходит в результате только механических взаимодействий материалов изделия;

– *молекулярно-механическое изнашивание* (адгезионное, избирательный перенос) – сопровождается также воздействием молекулярных или атомарных сил;

– *коррозионно-механическое изнашивание* (окислительное, фреттинг-коррозия) – происходит при трении материала, вступившего в химическое взаимодействие со средой.

Виды износа и повреждаемости при трении деталей машин можно классифицировать следующим образом:

1) *Допустимые (износ)*:

- механический нормальный окислительный износ;
- механический нормальный неокислительный износ;
- механический абразивный износ.

2) *Недопустимые (повреждаемость)*:

- схватывание I рода;
- схватывание II рода;
- фреттинг-коррозия (схватывание, динамическое окисление);
- механический абразивный износ (резание, царапание, прихvatывание);
- усталость при качении;
- другие виды повреждений (коррозия, кавитация, эрозия, смятие).

Причиной выхода из строя подавляющего числа машин и их механизмов (80–90%) является износ. В случае отсутствия масляного слоя между трущимися деталями процесс изнашивания происходит непрерывно. Износ ограничивает долговечность машин по разным условиям работоспособности:

- потере прочности (детали и узлы машин, определяющие формообразование изделий, измерительный инструмент, приборы);
- понижению КПД, ухудшению использования топлива, увеличению утечек (узел цилиндр-поршень и др.);
- понижению прочности вследствие уменьшения сечения, увеличения динамических нагрузок (зубья зубчатых и червячных колёс, оси подвижного состава на подшипниках скольжения);
- повышению шума (передачи машин);
- полному исчерпанию работоспособности – истиранию (тормозные колодки, тракты транспортных систем и т.д.).

Одним из видов изнашивания является механическая форма износа, преобладает абразивный износ. К нему также относится изнашивание выступающими неровностями тел более высокой твёрдости, твёрдыми структурными составляющими. Абразивное изнашивание проявляется в виде:

- микрорезания (при глубоком внедрении неровностей);
- малоцикловой усталости при повторном пластическом деформировании микронеровностей (со средней глубиной внедрения);
- усталости при многократном упругом деформировании (с малой глубиной внедрения).

К механическому износу относится гидро- и газообразное изнашивание поверхности частицами в потоке, носящее название эрозионного и кавитационного изнашивания.

Эрозия, вызываемая механическим (динамическим) воздействием высокоскоростного потока жидкости или газа и приводящая к усталости – расшатыванию, вымыванию отдельных частиц материала у поверхности, наблюдается в гидроприводах машин (разрушаются кромки золотников).

Кавитация связана с образованием в высокоскоростном потоке жидкости у поверхности твёрдого тела газовых пузырей и последующим восстановлением сплошности и интенсивными гидравлическими ударами. Механическое разрушение сопровождается коррозионными явлениями. Кавитация возможна во всех случаях появления турбулентного движения.

К механическим видам изнашивания относят также поверхностное пластическое деформирование, т.е. течение поверхностного слоя и изнашивание при хрупком разрушении, связанное с постепенным наклёпом.

Молекулярно-механическое изнашивание при схватывании и заеданиях наблюдается:

а) при режимах, характеризующихся высокими скоростями скольжения или давлениями вследствие недостаточной несущей способности масляной плёнки или её выдавливания;

б) при материалах с низкой и средней твёрдостью – незакалённых;

в) при местных отклонениях от правильной геометрической формы, забоинах, заусенцах;

г) при попадании продуктов износа в зону трущихся тел.

Коррозионно-механическое изнашивание проявляется при отрыве механическим воздействием продуктов коррозии и защитных оксидных плёнок. Разновидность – фреттинг-коррозия, т.е. разрушение постоянно контактирующих поверхностей в условиях тангенциальных микроскопических смещений без удаления продуктов износа.

Преобладающим в машиностроении является совместное действие механических и молекулярно-механических видов изнашивания.

Характеристики основных видов изнашивания

Окислительное изнашивание характеризуется постепенным разрушением поверхностей при трении в результате воздействия активных, пластически деформированных, слоёв металла с атомами кислорода, содержащегося в воздухе или в смазке и адсорбирующегося на поверхностях. Окислительное изнашивание проявляется при нормальных условиях эксплуатации узлов трения.

Нормальный окислительный износ характеризуется двумя формами:

1) на поверхностях трения образуются твёрдые растворы кислорода и тонкие эвтектики;

2) на поверхностях трения образуются химические соединения кислорода с металлом.

Этот износ может возникать как при трении скольжения, так и при трении качения, при сухом трении и граничной смазке. Скорости сколь-

жения при нормальном окислительном износе характеризуются следующими величинами:

- при сухом трении для отожжённых сталей – 1–4 м/с;
- при сухом трении для закалённых сталей – 0–7 м/с;
- при граничной смазке – 0–25 м/с.

Абразивный износ и повреждаемость характеризуются разрушением поверхности деталей машин, обусловленным наличием абразивной среды в области трения. Этот вид износа присущ трущимся поверхностям вследствие проникновения в область трения твёрдых частиц с воздухом, смазкой, при обработке абразивным инструментом и т.д. Различают две формы абразивных процессов, отличающихся характером взаимодействия частиц с поверхностью металла:

- 1) преобладает процесс механохимического разрушения (пластическое деформирование поверхностных объёмов, их окисление и последующее разрушение образующихся плёнок);
- 2) преобладает механическое разрушение слоёв (внедрение абразивных частиц и разрушение поверхностных объёмов металла без отделения частиц основного металла или со снятием микростружки).

К одному из процессов недопустимой повреждаемости поверхностей трения относится схватывание I рода. Этот процесс развивается в результате возникновения локальных металлических связей, их деформации и разрушения с отделением частиц металла или налипанием на поверхности контакта. Схватывание I рода появляется при трении скольжения с малыми скоростями относительного перемещения и давлениями, превышающими предел текучести на участках фактического контакта при отсутствии разделяющего слоя смазки и плёнки оксидов.

Схватывание II рода – процесс недопустимой повреждаемости поверхностей трения, характеризующийся образованием местных металлических связей, их деформацией и разрушением, выражающимся в образовании трещин, намазывании, переносе металла и отдельных частиц с поверхностей трения. Этот вид изнашивания проявляется при трении скольжения с большими скоростями относительного перемещения и значительными удельными давлениями, которые вызывают высокий градиент и интенсивный рост температуры в поверхностных слоях трущихся металлов и их термическую пластичность.

Заедание – один из опасных видов разрушения контактирующих поверхностей, который возникает при повышении силовой и тепловой нагруженности механизмов. Образование глубоких борозд, рисок, наростов, оплавлений является признаком заедания контактирующих деталей. В момент возникновения заедания резко увеличивается коэффициент трения скольжения (для тихоходных и среднескоростных трущихся тел) и быстро повышается температура сопряжённых поверхностей, в механизмах возникают динамические процессы, связанные с появлением ме-

ханических колебаний и шумов. Для высокоскоростных механизмов коэффициент трения может не увеличиваться. С явлением заедания встречаются в тяжелонапряжённых зубчатых передачах, кулачковых механизмах, шарнирных соединениях, подшипниках, в направляющих скольжения и др.

При трении качения в деталях машин возникают усталостные повреждения, которые являются результатом интенсивного разрушения поверхностных слоёв металла. Повторные пластические деформации, процессы упрочнения и разупрочнения металла поверхностных слоёв, возникновения остаточных напряжений и особые явления усталости являются основными характеристиками усталостных повреждений.

При резко интенсифицированном (динамическом) окислении или схватывании наблюдается разрушение поверхностей трения деталей машин, называемое фреттинг-процессом. Он возникает при скольжении с очень малыми возвратно-поступательными перемещениями и динамическом приложении нагрузок. Окисление при фреттинг-процессе носит специфичный характер, необычный для условий нормального трения, и протекает очень интенсивно. Процесс схватывания также резко выражен и наблюдается при относительно малых нормальных давлениях и при контактировании многих материалов. Значительная интенсификация окисления и схватывания вызвана динамическим характером нагружения, при котором на контакте резко увеличивается градиент деформаций и температур.

3. КЛАССИФИКАЦИЯ И СУЩНОСТЬ СПОСОБОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ. ВЫБОР СОСТАВА И СВОЙСТВ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

3.1. Классификация и сущность способов восстановления и упрочнения рабочих поверхностей

К рабочим поверхностям деталей машин в зависимости от условий их эксплуатации предъявляют определённые требования по различным свойствам: износостойкости, жаростойкости, коррозионной стойкости и др. Прочность деталей достигается путём использования соответствующих материалов с необходимыми исходными свойствами. Иными словами, при проектировании машин необходимо исходить из прочности современных материалов.

Важнейшими факторами, определяющими эксплуатационную надёжность и срок службы деталей и конструктивных элементов машин, являются также свойства материалов поверхностей этих деталей и элемен-

тов. Например, наземные здания и сооружения подвергаются разрушению под воздействием дождя, ветра и солнечных лучей, суда – от постоянного контакта с морской водой. Химическое оборудование интенсивно изнашивается в результате агрессивного действия различных химикатов, жидкостей и газов, строительные машины изнашиваются от абразивного действия грунта и песка, изнашивание деталей машин общего назначения происходит в результате взаимного трения их рабочих поверхностей.

Увеличение размеров оборудования, повышение его быстродействия и производительности сопровождаются ужесточением условий работы его узлов и механизмов. Увеличение срока службы деталей машин можно обеспечить путём образования на поверхности этих деталей и элементов слоёв или покрытий, обладающих высоким уровнем требуемых свойств – коррозионной стойкости при высоких температурах, износостойкости, твёрдости, жаростойкости и др.

В табл. 3.1 показаны основные способы поверхностной обработки деталей и узлов различных машин и механизмов, нашедшие практическое применение.

Таблица 3.1

Способы поверхностной обработки

Способы	Существо способа	Особенности и назначение
Химические и электрохимические способы		
Электролитическое металлопокрытие	Осаждение металла с образованием покрытия на поверхности изделия при пропускании тока между анодом (пластиной из металла, наносимого на изделие) и катодом (обрабатываемым изделием)	Никелирование осуществляют для повышения коррозионной стойкости. Никелевое покрытие (твёрдостью HV 140–240) используют в декоративных целях или для реставрации изношенных деталей машин. Хромирование обеспечивает получение твёрдого или мягкого покрытия. Хромовое покрытие, обладающее высокой коррозионной стойкостью, используют для декоративных целей, а твёрдое (HV 800–1000), с высокой износостойкостью – для повышения износостойкости деталей машин, реставрации изношенных деталей и поверхностного упрочнения штампов и прессформ для обработки металлов и пластмасс

Способы	Существо способа	Особенности и назначение
Химическое покрытие	Образование фосфатного, оксалатного, оксидного или иного химического неметаллического покрытия на поверхности металлических изделий, погружённых в раствор требуемого состава и выдерживаемых в нём при температуре до 200°С	Применяют при обработке изделий из алюминия, магния, меди, стали и других металлов для повышения коррозионной стойкости, в декоративных целях или как подготовку перед окраской, в частности как способ повышения коррозионной стойкости высокопрочных болтов, автомобильных деталей и др.
Химическое металлопокрытие	Образование покрытия на поверхности металлических изделий за счёт осаждения ионов металла из водного раствора хлорида металла без применения электрического тока	Используют для покрытия латунию, кадмием, медью, золотом, никелем, оловом и другими металлами
Физические способы		
Горячее металлопокрытие погружением	Образование покрытия путём погружения металлического изделия в ванну расплавленного металла	Горячее алюминирование – погружение стальных изделий в ванну расплавленного алюминия с температурой не ниже 680°С, с образованием поверхностного слоя сплава железа с алюминием толщиной до 0,1 мм для повышения их стойкости к окислению и коррозионной стойкости при высоких температурах. Горячее цинкование – погружение стальных изделий в ванну расплавленного цинка с температурой 450°С для образования металлопокрытия, состоящего из слоя чистого цинка и твёрдого слоя сплава железа с цинком

Способы	Существо способа	Особенности и назначение
Наплавка	Нанесение слоя расплавленного металла на оплавленную металлическую поверхность путём плавления присадочного материала теплотой кислородно-ацетиленового пламени или плазменной дуги и др.	Для восстановления изношенных деталей и создания на поверхности изделия слоя, обладающего повышенной износостойкостью, коррозионной стойкостью, жаропрочностью и другими свойствами
Диффузионное насыщение	Диффузионное насыщение поверхностного слоя изделия металлом при высокой температуре с использованием насыщающего состава, основным компонентом которого является металл, сплав или металлическое соединение	Диффузионное насыщение алюминием осуществляют в смеси алюминиевого порошка с наибольшим количеством хлористого аммония при температуре 850–1000°С. На поверхности изделия образуется слой сплава железа с алюминием, обладающий высокой стойкостью к окислению и коррозионной стойкостью при высокой температуре. Диффузионное насыщение хромом осуществляют в смеси феррохрома, йодистого аммония и порошкового каолина при температуре нагрева 950–1100°С при обработке углеродистой стали, содержащей до 0,3% С, и 800–950°С – при обработке высокоуглеродистой стали. Первую из сталей обрабатывают для повышения коррозионной стойкости, вторую – для повышения твёрдости
Вакуумное осаждение	Нанесение слоя путём осаждения атомов или молекул или соединения на поверхности изделия при их возгонке в условиях высокого вакуума (остаточное давление 13,3–1,3 МПа)	Для улучшения металлического блеска и повышения оптических свойств поверхности изделий

Способы	Существо способа	Особенности и назначение
Сульфидирование	Образование сульфидного слоя на поверхности стальных изделий в результате диффузии свободной серы, образующейся при температуре обработки (до 600°C) за счёт распада сульфуратора, состоящего из нейтральной соли, карбоната или другого неорганического вещества с добавлением сернистого соединения	Сульфидный слой предотвращает заедание, повышает износостойкость
Цементация	Диффузионное насыщение углеродом поверхности изделий из низкоуглеродистой или низколегированной стали при температуре 800–950°C. По виду карбюризатора цементация бывает газообразной (среда – оксид углерода, метан или иной восстановительный газ, содержащий углерод), твёрдой (среда – древесный уголь, углекислый натрий, кальций и барий или их смесь), жидкой (среда – соляная ванна на основе цианистого натрия)	Для упрочнения поверхностного слоя до твердости HV 700–850. Используют для обработки автомобильных и других деталей машин, инструментов
Азотирование	Образование нитридного слоя на поверхности изделий из стали, содержащей алюминий, хром, молибден и другие легирующие элементы, при нагреве до 475–580°C в среде аммиака. Азотирование бывает жидким и газовым	Для повышения износостойкости, коррозионной стойкости и усталостной прочности поверхностного слоя зубчатых колёс и других деталей машин с твердостью HV 500–1200

Способы	Существо способа	Особенности и назначение
Нитроцементация	Одновременное насыщение поверхности изделий из углеродистой стали азотом и углеродом при нагреве до температуры 750–900°С в атмосфере, состоящей из газообразного карбюризатора с добавлением нескольких процентов аммиака, с последующей закалкой изделия от температуры обработки	Для повышения износостойкости и коррозионной стойкости поверхности изделий
Электроискровое упрочнение	Образование упрочнённого слоя за счёт диффузионного переноса вещества электрода в поверхностный слой изделия в условиях высокотемпературного искрового разряда между изделием и электродом при передаче колебательных движений от магнитного вибратора на электрод, вибрация которого сопровождается периодическим размыканием цепи, соединяющей электрод с изделием с помощью конденсатора, подключённого к источнику тока через сопротивление	Применяют как способ повышения износостойкости за счёт поверхностного упрочнения. Используют для упрочнения штампов и пресс-форм
Газопламенная закалка	Образование упрочнённого слоя закалкой после нагрева поверхности стальных изделий пламенем горючей смеси (ацетилена, пропана или светильного газа с кислородом)	Для повышения износостойкости за счёт повышения твердости
Индукционная закалка	Упрочнение закалкой посредством нагрева поверхности стального изделия током высокой частоты (ТВЧ)	Для повышения износостойкости за счёт повышения твердости

Способы	Существо способа	Особенности и назначение
Эмалирование	Нанесение на поверхность металлических изделий стеклянной глазури и обжиг	Для повышения коррозионной стойкости и износостойкости, жаропрочности, электроизоляционных свойств
Механические способы		
Плакирование	Изготовление листа из двух и большего числа металлических слоёв, соединённых между собой способом прокатки, сварки взрывом или литьём	В качестве плакирующего материала используют коррозионно-стойкую сталь, никель, монель-металл, медь, сплав «хастеллой», титан и другие металлы, обладающие высокой коррозионной стойкостью
Дробеструйная обработка	Образование механически упрочнённого слоя (наклёп) путём бомбардирования поверхности изделия металлической дробью	Для повышения усталостной прочности изделий с упрочнением поверхностного слоя на глубину 0,3–0,5 мм
Напыление	Образование на поверхности изделия покрытия из нагретых до плавления или близкого к нему состояния частиц распыляемого материала с использованием теплоты сжигания горючей смеси или теплоты дугового разряда в газовых средах	Для повышения износостойкости, коррозионной стойкости, жаропрочности или для восстановления изношенных деталей. В качестве напыляемого материала используют металлы, сплавы, соединения металлов и другие материалы

3.2. Выбор состава и свойств упрочняющих покрытий

Виды основного металла

Наплавке подвергают основной металл самых разнообразных классов и видов, включая стали – углеродистую, низколегированную, литую, высокомарганцовистую аустенитную, коррозионно-стойкую и др.

Углеродистая и низколегированная стали обладают вполне удовлетворительной пластичностью и вязкостью, однако, высокий уровень их углеродного эквивалента требует применения при наплавке предварительного подогрева как средства предотвращения образования в них трещин.

Высокомарганцовистая аустенитная сталь содержит 0,9–1,3% С и 11–14% Mn. Низкая теплопроводность этой стали и высокий коэффициент линейного расширения (в 1,5 раза больше, чем для низкоуглеродистой стали) создают опасность растрескивания при наплавке.

При большом разнообразии составов коррозионно-стойкой стали по структурному признаку её можно разделить на пять групп: аустенитная, мартенситная, ферритная, аустенитно-ферритная, дисперсионно-упрочняемая.

Аустенитная коррозионно-стойкая сталь обладает высокими сварочно-технологическими свойствами, однако она склонна к деформации при сварке, поскольку её коэффициент линейного расширения в 1,5 раза больше, а теплопроводность в три раза меньше, чем для низкоуглеродистой стали. Для предотвращения охрупчивания при наплавке рекомендуется снижать температуру её предварительного подогрева и разогрева (между проходами).

Мартенситная коррозионно-стойкая сталь, обладая закаливаемостью, отличается низкой свариваемостью; при высоком содержании углерода сварка этой стали становится невозможной из-за интенсивного растрескивания.

Ферритная коррозионно-стойкая сталь, не склонная к закалке при охлаждении на воздухе, может подвергаться сварке. Но из-за склонности к охрупчиванию по причине укрупнения кристаллического зерна при температуре выше 900°C при наплавке этой стали происходит охрупчивание зоны термического влияния, которое, однако, можно предотвратить путём предварительного подогрева (100–200°C) и ограничения погонной энергии. Во время длительной выдержки при температуре 400–500°C эта сталь подвержена охрупчиванию (при 475°C), что выражается в значительном снижении относительного удлинения металла при нормальной температуре.

3.3. Области применения

3.3.1. Строительные машины

Наплавку применяют с целью повышения износостойкости различных деталей строительных машин, в частности при ремонте бульдозеров и одноковшовых экскаваторов для восстановления изношенных деталей.

Рабочие органы и другие детали этих машин работают в условиях интенсивного износа при контактировании с грунтом или скальными породами. К числу деталей, подвергаемых восстановлению наплавкой, относятся режущие кромки бульдозерных отвалов, зубья ковш экскаватора и детали ходовой части (катки, траки, ленивцы, звёздочки, башмаки и др.).

При работе в контакте с песком повышение твёрдости материала сопровождается линейным снижением относительного износа. Вместе с тем

при работе в условиях умеренного и сильного изнашивания (гравий, щебень) повышение твёрдости до HV 400–500 сопровождается заметным снижением износа, но при дальнейшем её повышении относительный износ почти не изменяется.

Катки, траки, ленивцы и другие детали гусеничной ходовой части подвергают обычно автоматической наплавке под флюсом или в среде углекислого газа, обеспечивающей высокопроизводительное нанесение ровного слоя износостойкого сплава на рабочие поверхности деталей (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Режимы автоматической наплавки под флюсом износостойких покрытий

Детали	I _д , А	U _д , В	Температура, °С		Средняя толщина наплавки, мм	Число слоёв
			Подогрев	Металл наплавки		
Катки	325–350	28	250	200–250	6	3
Ленивцы	325–350	28	250	200–250	7	3
Траки	350–375	30	200	150–200	4	2

Зубья и ведущие звёздочки подвергают ручной или полуавтоматической наплавке.

3.3.2. Землечерпальные суда

Врубная головка (рис. 3.1) содержит каркас с зубьями, которые при работе землесосного снаряда врубаются в породу. Для выемки глины и другого мягкого и вязкого грунта используют врубные головки лопастного типа, подвергающиеся абразивному износу. Для наплавки таких врубных головок используют обычные наплавочные материалы, предназначенные для повышения стойкости к абразивному изнашиванию.

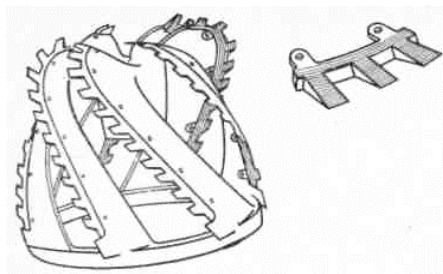


Рис. 3.1. Режущий орган врубной головки

Для выемки мягких грунтов используют рабочие органы со вставными фиксируемыми пластинами, а для выемки скального грунта – рабочие органы, наплавленные материалами особо высокой твёрдости, к числу которых относятся мартенситные наплавочные материалы и карбиды вольфрама. На рис. 3.2 показан сравнительный износ режущих органов землесосных снарядов на 10000 м³ вынутого твёрдого песчаного грунта, наплавленных различными материалами: *A* – без наплавки; *Б* – наплавка сорбитными материалами; *В* – наплавка мартенситными материалами (HV 650); *Г* – полосчатая наплавка карбидом вольфрама на мартенситный наплавленный слой (HV 650).

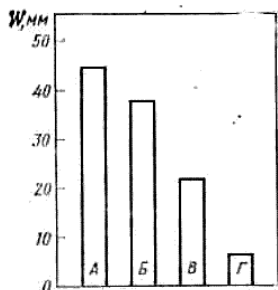


Рис. 3.2. Диаграмма сравнительной износостойкости режущих органов землесосных снарядов

Для предотвращения охрупчивания и отрыва от подложки при наплавке этими материалами применяют способы сетчатого и полосчатого наложения валиков (рис. 3.3).

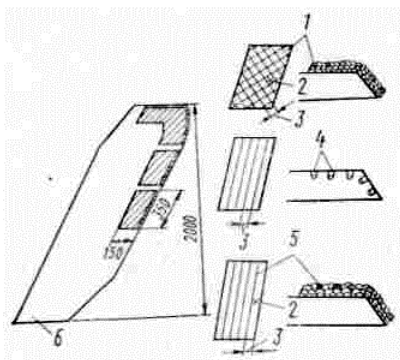


Рис. 3.3. Способы наплавки валиков на режущие органы землесосных снарядов: 1 – сетчатая наплавка карбидом вольфрама; 2 – мартенситный наплавочный материал; 3 – расстояние между валиками 300 мм; 4 – тёмные участки – валики карбида вольфрама, светлые участки – наплавка мартенситным материалом; 5 – параллельные валики, наплавленные карбидом вольфрама; 6 – основной металл – литая низкомарганцовистая сталь

Корпус насоса представляет собой стальную ёмкость, внутри которой монтируют рабочее колесо (крыльчатку). Во время работы насоса при скоростном вращении рабочего колеса через его корпус проходит морская вода со взвешенным в ней грунтом, что вызывает абразивный износ в сочетании с эрозионным износом, обусловленным высокой скоростью движения морской воды и грунта через корпус насоса.

На участках максимального износа наносят подслои электродами с покрытием основного вида с использованием подкладок – пластин из низкоуглеродистой стали. Затем выполняют износостойкую наплавку с использованием таких материалов, как содержащая бор мартенситная сталь, высокохромистая сталь и карбид вольфрама.

При восстановлении изношенных крупногабаритных корпусов насосов землесосных снарядов, для которых расходуют сотни килограммов наплавочного материала, существует опасность деформации изделия под влиянием термического цикла наплавки, для предотвращения которой следует избегать концентрации тепла, например, путём разделения наплавляемой поверхности на отдельные небольшие участки и выбора оптимальной схемы (порядка) их наплавки.

При изготовлении новых корпусов насосов для увеличения срока службы следует применять износостойкую наплавку, особенно на участке входного патрубка, работающего в условиях наиболее интенсивного износа. Высоких результатов достигают при наплавке этих участков карбидом вольфрама или высокохромистыми железными сплавами.

3.3.3. Металлургическое оборудование

Наплавке подвергают прокатные валки, корпуса засыпных аппаратов доменных печей, направляющие и другие элементы металлургического оборудования.

При восстановлении изношенных валков наплавкой важнейшее значение имеет содержание углерода в основном металле. При содержании углерода в пределах 0,3–0,8% наплавка протекает сравнительно успешно, при содержании углерода 0,8–1,5% перед износостойкой наплавкой необходимо наплавлять мягкий подслой или проводить предварительную термообработку валков. При содержании углерода более 1,5% наплавка становится невозможной, хотя в последнее время такие валки пытаются восстанавливать способом электрошлаковой наплавки с использованием явления сверхпластичности металла в процессе протекания мартенситных превращений.

При эксплуатации валки подвергаются изнашиванию трением, усугубляемому термическим растрескиванием и влиянием водяного пара, что приводит к возникновению неоднородного износа.

При таком изнашивании не исключено образование поверхностного слоя повышенной твёрдости, который перед наплавкой следует удалить до обнаружения основного металла со стабильной структурой.

Для предотвращения образования трещин и других дефектов в наплавленном металле, исключения большого разброса твёрдости по восстанавливаемой поверхности валка необходимо применение предварительного и сопутствующего подогрева и последующей термообработки.

Типичным примером высокопроизводительной наплавки ленточным электродом является её применение для износостойкой наплавки слоёв большой толщины при ремонте прокатных валков.

3.3.4. Железнодорожный подвижной состав

Восстановительной наплавке подвергают разнообразные по форме и размерам детали железнодорожного подвижного состава, что затрудняет механизацию наплавочных работ. Кроме того, неодинаковый износ поверхности детали позволяет осуществлять лишь ручные или полуавтоматические способы наплавки.

Для наплавки деталей железнодорожного подвижного состава, изнашивающихся в результате трения металлических поверхностей, используют наплавочный материал твёрдостью HV 250–350. При попытке заменить ручную наплавку покрытыми электродами более производительными способами обычно обращаются к сварке в среде углекислого газа.

Процесс наплавки включает следующие операции:

- зачистка наплавляемой поверхности наждачным кругом;
- установка наплавляемой поверхности детали в горизонтальное положение (с помощью специального сварочного приспособления);
- измерение величины износа детали и сопоставление размеров с требуемыми размерами;
- предварительный подогрев (например, до 150°C);
- наплавка с учётом износа с периодическим измерением толщины наплавленного слоя;
- окончание наплавки в момент, когда толщина слоя обеспечивает получение требуемого размера с учётом на последующую механическую обработку;
- проверка правильности выполнения наплавки;
- последующая термообработка для снятия напряжений при температуре ~600°C (для некоторых деталей: рычагов, подвесок, кронштейнов и т.п. термообработку после наплавки не проводят);
- механическая обработка детали под окончательные размеры;
- контроль качества.

3.3.5. Сосуды высокого давления

Сосуды высокого давления изготавливают из плакированной стали, получаемой прокаткой или сваркой взрывом, либо из толстого листа с последующей наплавкой. В последнее время, в связи с увеличением габаритов сосудов высокого давления, предназначенных для атомной энергетики и химической промышленности (установки для десульфурации

мазута и т.п.), расширилось применение стального листа особо большой толщины, из которого сосуды могут быть изготовлены только с помощью наплавки.

В связи со сложностью конструкции таких сосудов секции корпуса и днище подвергают наплавке по отдельности до сварки. После изготовления секции корпуса (обечайки) выполняют её наплавку, предварительно подвергнув пескоструйной обработке поверхности для удаления с них загрязнений. Тщательное выполнение зачистки служит залогом качественной бездефектной наплавки.

Обечайки корпуса устанавливают обычно на роликовые стенды, и наплавку выполняют по окружности кольцевыми валиками; днище и крышку корпуса наплавляют по спирали.

После наплавки сосуды подвергают длительной термообработке.

3.3.6. Прочие изделия

Для наплавки клапанов используют стеллит [Co + (Cr, W, Si)]. Для предотвращения образования трещин в наплавленном слое предварительный подогрев клапанов проводят в две ступени, включая первичный нагрев, выдержку при этой температуре, подъём температуры подогрева до заданной и поддержание этой температуры до окончания наплавки (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Температура предварительного подогрева при наплавке стеллита

Сталь	Температура подогрева, °С
	1 ступень
Углеродистая	200–450
Низколегированная	300–450
Высокохромистая	400–600
Коррозионно-стойкая	400–600
Температура подогрева для 2 ступени 500–700°С	

Для предотвращения растрескивания металла после наплавки осуществляют последующую термообработку деталей (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Режимы термообработки деталей после наплавки стеллита

Сталь	Режим термообработки	
	Температура, °С	Охлаждение
Углеродистая	620–650	Замедленное
Низколегированная	650–700	Замедленное
Высокохромистая	650–700	Замедленное
Коррозионно-стойкая	950–1100	Быстрое

Для реставрации штампов обычно применяют ручную электродугую наплавку покрытыми электродами со стержнями из высокохромистой аустенитной проволоки.

Наплавку осуществляют после предварительного подогрева штампа до температуры 300–400°С.

Высокие требования к точности изготовления штампов требуют принятия мер для предотвращения деформации деталей при наплавке. Одна из таких мер связана с определённой последовательностью проведения наплавки отдельными небольшими участками в шахматном порядке, с симметричным расположением и т.п. Наплавку следует проводить на рожке, обеспечивающем минимальное проплавление основного металла.

4. СОВРЕМЕННЫЕ НАПЛАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ И ИЗНОСОСТОЙКОЙ НАПЛАВКИ. КОРРОЗИОННО-СТОЙКИЕ НАПЛАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. ХАРАКТЕРИСТИКА, СВОЙСТВА И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Сущность процесса наплавки состоит в расплавлении присадочного материала с высокими эксплуатационными свойствами теплом газового пламени, электрической дугой или других источников тепла и соединении его с основным металлом детали. При этом способе можно сравнительно быстро получить слой наплавленного металла значительной толщины, что особенно важно при восстановлении сильно изношенных деталей. Операции наплавления в этих случаях можно проводить многократно, что уменьшает расход запасных частей.

Наплавку материалов с необходимыми свойствами применяют также для повышения твёрдости и износостойкости рабочих поверхностей деталей, изготовленных из обычных конструкционных сталей.

Методом наплавки можно создать биметаллические изделия, у которых высокие показатели поверхности сочетаются с удовлетворительной вязкостью сердцевины, изготовленной из дешёвой углеродистой стали. Это позволяет получить большую экономию дорогих легированных сталей.

Широкое применение наплавки получило в связи с гибкостью, простотой и экономичностью этого способа, возможностью наносить на поверхность детали материал любого химического состава и физико-механических свойств. Это позволяет создавать на поверхности деталей слой материала, обладающий различными свойствами: хорошей сопротивляемостью износу при комнатной и повышенной температурах, высокой твёрдостью и жаростойкостью, способностью сопротивляться термической усталости, сохранять длительную стойкость в агрессивных средах, иметь высокую стойкость против струйного и абразивного износов.

Наплавку применяют для упрочнения многих деталей металлургического оборудования. Так, в прокатном производстве упрочняют электродуговой наплавкой валки гладкие и калибровочные различных станов, детали шпинделей прокатных станов, ножи для горячей и холодной резки проката, ролики правильных машин и роллангов, прессовый инструмент, волочильный инструмент и др.

Применение различных наплавочных материалов зависит от необходимости получить нужные свойства наплавленного металла.

4.1. Материалы для восстановительной и износостойкой наплавки

К группе *литых твёрдых сплавов* относятся стеллиты (марок В2К и В3К) и стеллитоподобные сплавы (сормайт № 1 и сормайт № 2). Эти сплавы представляют собой раствор карбида хрома в кобальте, никеле и железе. Основой твёрдого раствора стеллитов является кобальт, а стеллитоподобных сплавов – никель или железо.

Зернообразные твёрдые сплавы представляют собой механическую смесь одного или нескольких металлов с углеродом и боридами. При расплавлении электродом образуется сплав – твёрдый раствор карбидов этих металлов в железе. К этой группе относятся вокар, сталинит, виском-9 и боридные смеси.

Порошковые электроды изготавливают из порошковой проволоки с нанесением различных покрытий. Наиболее дешёвыми и доступными наполнителями этих электродов являются ферромарганец и сталинит.

К *литым и спечённым карбидам* относится сплав рэлит в виде трубчатых электродов для наплавки газовым пламенем и в виде дроблёных зёрен для наплавки токами высокой частоты.

Металлические электроды позволяют в широких пределах изменять химический состав и свойства наплавленного металла. Это достигается путём легирования наплавленного металла с помощью электродного покрытия с необходимым количеством легирующих элементов. Простота использования этих электродов даёт возможность применять их для наплавки деталей, работающих в разнообразных условиях.

По виду обмазки и марке стали стержней электроды для наплавки деталей делятся на три группы:

- 1) с легирующими покрытиями и стержнями из малоуглеродистой стали (Св-08, Св-15);
- 2) со стержнями из легированной стали (Св-30ХГА, Св-12МХ);
- 3) комбинированные электроды, в которых легирование через стержень дополняется легированием через покрытие.

Толщину наплаваемого слоя устанавливают в зависимости от условий работы детали и толщины износа поверхности. Для деталей, работающих

на истирание, она не должно превышать 2,5–4 мм. При ручной наплавке колебание толщины одного слоя может быть в пределах 0,25–0,5 мм.

Сормайтом № 1 обычно наплавляют слой толщиной 0,5–5 мм и лишь иногда толщиной 12–16 мм (например, линеек прокатных станов). Толщина слоя сормайта обычно составляет 1,5–3,5 мм и иногда достигает 7–10 мм. Покрытие толщиной более 1,5 мм обычно получают из нескольких слоёв, так как при покрытии в один слой сплав перемешивается с основным металлом.

Выбор марки наплавочного материала производится в соответствии с условиями работы упрочняемых деталей и особенностями применяемого метода наплавки.

4.1.1. Наплавочная проволока сплошного сечения

Углеродистые и легированные проволоки применяют для восстановления размеров изношенных деталей. Высокохромистые проволоки Св-10Х13, Св-08Х14ГТ, Св-10Х17Г обеспечивают повышенную коррозионную стойкость и износостойкость наплавленного металла. Применяют также пружинные проволоки, проволоку из жаропрочных сплавов и др.

Проволока сварочная для наплавки (ГОСТ 2246-75) и проволока стальная наплавочная (ГОСТ 10543-98) для автоматической наплавки под флюсом, в защитных газах, а также для газовой наплавки, может изготавливаться из стали, выплавленной электрошлаковым, вакуумно-дуговым или вакуумно-индукционным перепадами. Обычно для наплавки применяют проволоки диаметром 0,8–6 мм. С целью уменьшения оксидов в металле наплавки проволоки содержат увеличенное количество раскислителей: марганца, кремния, алюминия, титана.

В табл. 4.1 даются рекомендации по применению проволок в зависимости от условий работы наплавленного металла.

Таблица 4.1

Рекомендуемые области применения проволок для наплавки

Условия работы	Рекомендуемые марки проволок
Абразивный износ	Нп-50, Нп-65, Нп-80, Нп-40Х13, Нп-40Х3Г2МФ, Нп-30ХГСА, Нп-Г13А
Абразивный износ с большими удельными давлениями и ударными нагрузками	Нп-40Х3Г2МФ, Нп-30Х10Г10Т, Нп-105Х, Нп-40Х2Г2М
Износ от трения по металлу при больших удельных давлениях	Нп-30, Нп-40, Нп-50, Нп-65, Нп-80, Нп-40Г, Нп-50Г, Св-08, Св-08ГС, Нп-40Х2Г2М, Нп-Х13, Нп-50ХФА, Св-18ХГС

Условия работы	Рекомендуемые марки проволок
Износ от трения по металлу при больших давлениях. Термическая усталость	Нп-30ХГСА, Нп-30Х5, Нп-5ХМА, Нп-65Г, Нп-50Х6ФМС, Нп-40Х13, Нп-45Х4Б3Ф, Нп-60Х3В10Ф, Нп-45Х2В8Т
Интенсивный износ с ударными нагрузками при повышенных температурах в агрессивных средах	Нп-Х15Н60, Нп-Х20Н80Т
Коррозионно-стойкие покрытия	Нп-20Х14, Нп-Х15Н60, Св-20Х13, Св-06Х19Н9Т, Св-08Х19Н9ФС2, Св-10Х17Т

Характеристики некоторых марок проволоки стальной наплавочной сплошного сечения по ГОСТ 10543-98 представлены в табл. 4.2. Характеристики некоторых марок проволоки стальной сварочной сплошного сечения по ГОСТ 2246-70, рекомендуемой для наплавки, представлены в табл. 4.3.

4.1.2. Покрытые электроды для ручной дуговой наплавки

Покрытые электроды для ручной дуговой наплавки используют в виде стержней с нанесённым на них покрытием, продукты сгорания и разложения которого обеспечивают защиту дуги и ванны жидкого металла от окружающего воздуха.

Благодаря низкому содержанию водорода в наплавленном металле, получаемом при наплавке электродами с покрытием основного вида, значительно снижается опасность возникновения трещин при наплавке деталей из высокоуглеродистой и легированной стали, а также крупногабаритных стальных отливок без предварительного подогрева.

Наплавка электродами с высокорутиловым покрытием, содержащим до 35% диоксида титана, отличается высокой технологичностью, характеризуемой, в частности, стабильностью горения дуги, отсутствием разбрызгивания, хорошим отделением шлаковой корки от поверхности валика при небольшом проплавлении основного металла, образованием ровного валика наплавленного металла, а следовательно, простотой последующей механической обработки. Вместе с тем металл, наплавленный электродами с этим покрытием, отличается повышенным содержанием водорода, поэтому при наплавке крупногабаритных отливок или основного металла, подвергающегося закалке с охлаждением на воздухе, существует опасность возникновения трещин.

Таблица 4.2

Проволока стальная наплавочная сплошного сечения по ГОСТ 10543-98

Марка	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %						Твёрдость наплавленного металла	Типичные объекты наплавки
	С	Mn	Si	Cr	Ni	прочих		
Нп-30	0,27–0,35	0,5–0,8	0,17–0,37	≤ 0,25	≤ 0,3	-	160–220 НВ	Оси, валы, шпиндели
Нп-45	0,42–0,5						170–230 НВ	
Нп-85	0,82–0,9			280–350 НВ			Коленчатые валы, крестовины карданов	
Нп-40Г	0,35–0,45	0,7–1,0	≤ 0,3	-	-	180–240 НВ	Оси, валы, шпиндели	
Нп-65Г	0,6–0,7	0,9–1,2				230–310 НВ		
Нп-30ХГСА	0,27–0,35	0,8–1,1	0,9–1,2	0,8–1,1	≤ 0,4	220–300 НВ	Обжимные прокатные валки, крановые колёса	
Нп-50ХНМ	0,5–0,6	0,5–0,8	≤ 0,35	0,5–0,8	1,4–1,8	0,15–0,3 Мо	41,5–51,5 НRC	Штампы горячей штамповки
Нп-40Х3Г2МФ	0,35–0,45	1,3–1,8	0,4–0,7	3,3–3,8	≤ 0,4	0,1–0,2 V, 0,3–0,5 Мо	39,5–44,5 НRC	Ролики рольгангов

Окончание табл. 4.2

Марка	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %						Твёрдость наплавленного металла	Типичные объекты наплавки
	С	Mn	Si	Cr	Ni	прочих		
Нп-50X6ФМС	0,45–0,55	0,3–0,6	0,8–1,2	5,5–6,5	$\leq 0,35$	0,35–0,55 V, 1,2–1,6 Mo	43,5–49,5 HRC	Штампы, прокатные валки
Нп-20X14	0,16–0,25	$\leq 0,8$	$\leq 0,8$	13,0–15,0	$\leq 0,6$	-	34–39,5 HRC	Детали запорной арматуры
Нп-45X4В3ГФ	0,4–0,5	0,8–1,2	0,7–1,0	3,6–4,6		2,5–3,0 W, 0,2–0,4 V	39,5–46,5 HRC	Штампы, прокатные валки
Нп-45X2В8Г		1,0–1,4	0,4–0,7	2,2–3,0		8,0–9,5 W, 0,3–0,5 V, 0,2–0,9 Ti	41,5–47,5 HRC	
Нп-Г13А	1,0–1,2	12,5–14,5	$\leq 0,4$	$\leq 0,6$		-	220–280 НВ	Крестовины стрелочных переводов, литьё из стали Г13Л

Таблица 4.3

Проволока стальная сварочная сплошного сечения по ГОСТ 2246-70, рекомендуемая для наплавки

Марка	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %						Твёрдость наплавленного металла	Типичные объекты наплавки
	С	Mn	Si	Cr	Ni	прочих		
Св-08	≤ 0,1	0,35–0,6	≤ 0,03	≤ 0,15	≤ 0,3	-	120–160 НВ	Оси, валы, шпиндели
Св-08Г2С	0,05–0,11	1,8–2,1	0,7–0,95	≤ 0,2	≤ 0,25		180–210 НВ	
Св-18ХГС	0,15–0,22	0,8–1,1	0,9–1,2	0,8–1,1	≤ 0,3		240–300 НВ	
Св-20Х13	0,16–0,24	≤ 0,6	≤ 0,6	12–14	-		42–48 HRC	Детали запорной арматуры
Св-10Х17Т	≤ 0,12	≤ 0,8	≤ 0,7	16–18	≤ 0,6	0,2–0,5 Ti	160–190 НВ	Детали, работающие в условиях коррозии
Св-06Х19Н9Т	≤ 0,08	1,0–0,2	0,4–1,0	18–20	8–10	0,5–1,0 Ti		
Св-08Х20Н9Г7Т	≤ 0,1	5–8	0,5–1,0	18,5–22		0,6–0,9 Ti		

Электроды с карбонатно-рутиловым покрытием занимают по технологическим характеристикам промежуточное положение: отличаются сравнительно хорошей технологичностью при наплавке, обеспечивая стойкость наплавленного металла к возникновению трещин.

Электроды для ручной дуговой наплавки изготавливают по ГОСТ 10051-75. В качестве стержня обычно используют проволоку диаметром 3–5 мм, редко до 8 мм.

Стандарт устанавливает 44 типа наплавочных электродов. Значительное количество электродов для наплавки слоёв с особыми свойствами производится по отраслевым техническим условиям. Твёрдость наплавленного металла и химический состав проверяются по ГОСТ 9466-75.

В обозначении электродов твёрдость наплавки характеризуется индексами, указывающими её величину по Виккерсу и Роквеллу, а цифры говорят о её величине.

В табл. 4.4 представлены рекомендации по использованию некоторых марок электродов в зависимости от условий работы наплавленного металла.

Таблица 4.4

Рекомендуемые области применения электродов для наплавки

Условия работы	Типичные структуры наплавки	Марки электродов
Абразивный износ	Мартенсит, перлит	13КН/ЛИВТ, Т-620, Т-590, ВСН-8
Абразивный износ при больших удельных давлениях и ударных нагрузках		ОЗН-400У, ТКЗ-Н, УЗ-40, ОЗИ-3, ОМГ-Н, ВСН-10, ОЗШ-1, 12-АН/ЛИВТ
Износ от трения по металлу при больших давлениях	Перлит, мартенсит, аустенит	ЦН-16, ЭНУ-2, ОЗН-250У, ОЗН-300У, УОНИ-13/НЖ, ОЗН-350У, ВСН-6, ВСН-9, ЦНИИН-4
Износ от трения по металлу при больших удельных давлениях и повышенных температурах. Термоусталость	Мартенсит, карбиды	ОЗШ-2, ОЗШ-3, ОЗШ-4, УОНИ-13/4Х10В5МФ, ЭН-60М, ЦИ-1М, ОЗИ-4, ОЗИ-5
Износостойкие наплавки на металлорежущий и быстро-режущий инструмент		ИТ-10, ЖСН-60Р, ОЗИ-5

Условия работы	Типичные структуры наплавки	Марки электродов
Интенсивный износ с ударными нагрузками при повышенных температурах в агрессивных средах	Аустенит	ЦН-6Л, ВПИ-1, ЦН-12М, ЦН-2
Создание коррозионно-стойких поверхностей	Аустенит с 2–8% феррита	УОНИ-13/Н1-БК, ЗИО-8, ЭА-898/21Б, ЭА-400/10У, ЭА-855/51, ЭА-582/23,

В табл. 4.5 представлены характеристики некоторых марок электродов для ручной дуговой наплавки, выпускаемых и поставляемых по ГОСТ 10051-75.

4.1.3. Наплавочные ленточные электроды

Ленты подразделяются на следующие виды: стальные холоднокатаные, порошковые и металлокерамические. Все ленты изготавливаются по техническим условиям. Нередко для наплавки применяют стандартизованную стальную ленту, предназначенную для других целей (ГОСТ 4986-79).

В России ленточные электроды или ленты производятся толщиной 0,4–1,0 мм при ширине 20–100 мм. Ленточные электроды применяют в основном 0,4 мм при ширине 25; 37,5; 50; 75 мм. Наплавку ленточными электродами осуществляют обычно методом автоматической наплавки под флюсом. Для наплавки антикоррозионных покрытий применяют ленты из легированных сталей и сплавов.

Для износостойкой наплавки слоёв твёрдого сплава, ввиду невозможности изготовления из такого сплава холоднокатаной ленты, используют порошковую ленту (марки ПЛ), представляющую собой оболочку из низкоуглеродистой или специальной стальной ленты с сердцевиной, заполненной шихтой из легирующих и шлакообразующих компонентов (рис. 4.1). Порошковую ленту широко применяют для наплавки под флюсом, в среде углекислого газа и открытой дугой.

Металлокерамическую ленту, как правило, изготавливают спеканием порошкообразных компонентов (марки ЛС), обеспечивая ей необходимые прочностные и пластические свойства.

Все ленты поставляют потребителям в рулонах.

Таблица 4.5

Электроды для ручной дуговой наплавки по ГОСТ 10051-75

Марка (тип)	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %								Твёрдость наплавленного металла	Типичные объекты наплавки
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	прочих		
ОЗН-250У (Э-10Г2)	0,08–0,12	2,0–3,3	≤ 0,15	-	-	-	-	-	20–28 HRC	Оси, валы
ОЗН-350У (Э-12Г4)	0,09–0,18	3,6–4,5							35–40 HRC	Оси, валы, детали автосцепок
ОЗН-400М (Э-15Г5)	0,12–0,2	4,1–5,2							40–44 HRC	
ОЗШ-1 (Э-16Г2ХМ)		1,2–2,0	0,8–1,3	0,9–1,3	0,7–0,9	35–39 HRC	Молотковые, высадочные штампы			
ЭН-60М (Э-70Х3СМТ)	0,5–0,9	0,4–1,0	0,8–1,2	2,3–3,2	-	0,3–0,7	-	0,3 Ti	52–58 HRC	Штампы, ножи
ОЗШ-3 (Э-37Х9С2)	0,25–0,5		1,4–2,8	8–11	-	-	-			
12-АН/ЛИВТ (Э-95Х7Г5С)	0,8–1,1	4–5	1,2–1,8	6–8	-	-	-	-	25–32 HRC	Детали земснарядов, драг, экскаваторов
ЭН-Х12М (Э-100Х12М)	0,85–1,15	≤ 0,5	≤ 0,5	11–13	-	0,4–0,6	-	-	53–60 HRC	Штампы, ножи

Продолжение табл. 4.5

Марка (тип)	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %								Твёрдость наплавленного металла	Типичные объекты наплавки
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	прочих		
ЦШ-1 (Э-30В8Х3)	0,3	≤ 0,4	≤ 0,3	2,0–3,5	-	-	-	7–9 W	40–50 HRC	Штампы, ножи
ЦИ-2У (Э-90В10Х5Ф2)	0,9		≤ 0,4	4–5			2,0	10 W	57–62 HRC	Штампы, ножи, многолезвийный инструмент
ОЗИ-3 (Э-90Х4М4ВФ)	0,6–1,2	≤ 0,7	≤ 0,8	2,8–4,3		2,4–4,6	0,9–1,6	0,6–1,3 W	58–63 HRC	Штампы, ножи
ОЗИ-5 (Э-10 К18В11М10 Х3СФ)	0,8–0,12	0,3–0,7	0,8–1,6	1,8–3,2		7,8– 11,2	0,4–0,8	8,8– 12,2W; 15,7– 19,3Co	58–63 HRC	
ОЗШ-6 (Э-10 Х33Н11М3СГ)	≤ 0,13	0,8–2,0	0,8–2,3	30–34	9–13	2,0–3,2		53–61 HRC		
ЦНИИН-4 (Э-65Х25Г13Н3)	0,5–0,8	11–14	≤ 0,8	22– 28,5	2,0– 3,2	-	-	-	250 НВ	Крестовины стрелочных переводов
ЦН-6Л (Э-08Х 17Н8С6Г)	0,05– 0,12	1–2	4,8– 6,4	15– 18,4	7–9					28–37 HRC

Марка (тип)	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %								Твёрдость наплавленного металла	Типичные объекты наплавки	
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	прочих			
ЦН-12М (Э-13Х16Н8М5 С5Г4Б)	0,08– 0,18	3–5	3,8–5,2	14–19	6,5– 10,5	3,5–7,0		0,5–1,2 Nb	28–37 HRC	Детали запорной арматуры для энергетики и нефтехимии	
Т-590 (Э-320 Х25С2ГР)				22–27			-	0,5– 1,5 В	57–63 HRC	Детали, работающие в условиях абразивного изнашивания	
Т-620 (Э-320 Х23С2ГТР)	2,9–3,5	1,0–1,5	2,0– 2,5	22–24	-	-		0,5– 1,5 В; 0,5– 1,5 Ti	57–63 HRC		
ВСН-6 (Э- 110Х14В13Ф2)	0,9–1,3	0,5–0,6	0,3–0,6	12–16				1,4– 2,0	11–15 W		51–56 HRC

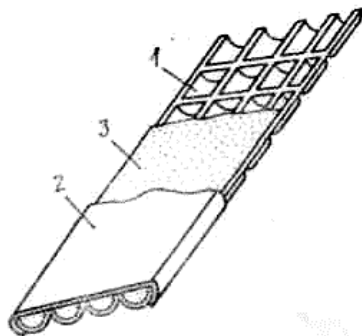


Рис. 4.1. Порошковая лента:

- 1 – нижняя гофрированная стальная лента; 2 – верхняя стальная лента;
3 – шихта из легирующих и шлакообразующих компонентов

В табл. 4.6 представлены области применения некоторых марок наплавочных лент в зависимости от условий работы наплавленного слоя.

Таблица 4.6

Рекомендуемые области применения наплавочных лент

Условия применения	Рекомендуемые марки лент
Абразивный износ, сопровождающийся большими удельными давлениями и ударными нагрузками	ПЛ-АН126, ПЛ-У25Х25Г3Ф2РН, ПЛ-У30Х30Г3ТЮ, ПЛ-АН171, ПЛ-АН101, ПЛ-У40Х38Г3РТЮ, ЛС-70Х3НМА, ЛС-20Х10Г10Т
Износ от трения по металлу при больших давлениях и повышенных температурах. Термическая усталость	ПЛ-АН111, ЛС-5Х4В2М2ФС, ЛС-5Х4В3ФС, ЛС-1Х14Н3, Св-2Х13
Интенсивный износ с ударными нагрузками при повышенных температурах в агрессивных средах	Св-03Х15Н35Г7М6Б, ПЛ-АН150, Св-04Х19Н11М3, Св-03Х22Н11Б6, Св-10Х16Н25АМ6, Св-07Х25Н13, Св-04Х20Н10Г2Б, ЛС-08Х21Н9Т,

В табл. 4.7 представлены характеристики некоторых марок ленты стальной холоднокатаной для наплавки под флюсом, в табл. 4.8 – порошковой ленты для наплавки, в табл. 4.9 – ленты наплавочной спечённой на основе железа для износостойкой и коррозионно-стойкой стали.

Таблица 4.7

Характеристики ленты стальной холоднокатаной для наплавки под флюсом

Марка	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %							Твёрдость наплавленного металла	Типичные объекты наплавки
	С	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	прочих		
50Г	0,45–0,56	0,7–1,0	0,17–0,37	≤ 0,3	≤ 0,3	-	-	200–240 НВ	Оси, валы, ролики
65Г	0,6–0,7	0,9–1,2						230–310 НВ	
50ХФА	0,46–0,54	0,5–0,8		0,8–1,1	≤ 0,4			0,1–0,2 V	40–50 HRC
50Х6ФМС	0,45–0,55	0,3–1,6	0,8–1,2	5,5–6,5	≤ 0,35	1,2–1,6	0,35–0,55 V	45,4–51,5 HRC	Прокатные валки
СВ-20Х13	0,16–0,24	≤ 0,6	≤ 0,6	12–14	-	-	-	42–48 HRC	Плунжеры гидропрессов
СВ-04Х19Н11М3	≤ 0,6	1–2		18–20	10–12	2–3			
СВ-10Х16Н25АМ6	0,08–0,12			15–17	24–27	5,5–7,0		0,1–0,2 N	
СВ-07Х25Н13	≤ 0,9			0,5–1,0	23–26	12–14		-	-
Нп-02Х22Н11Г	≤ 0,02	1,2–1,8	0,2–0,4	21–13	10,5–11,5	-	-	160–190 НВ	Корпусные детали нефтехимического оборудования

Таблица 4.8

Характеристики порошковой ленты для наплавки

Марка (старое обозначение)	Способ наплавки	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %								Твёрдость наплавленного металла, HRC	Типичные объекты наплавки
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	Mo	прочих		
ПЛ-Нп-10Г2СТ	С	0,1	0,2	1,0	-	-	0,2	-	-	20–26	Оси, валы
ПЛ-Нп-15Х4 В2М2Г2СФТ		0,15			4,0		0,1	0,2	2 W; 0,5 V	28–36	Ролики рольгангов, тормозные шквивы, катки, колёса гусеничных тракторов
ПЛ-Нп-120 Х22Р3Г2СТ (ПЛ-АН171)		1,2			22		1,0	3 W	65–68	Детали, работающие в условиях абразивного изнашивания	
ПЛ-Нп-300 Х25С3Н2Г2 (ПЛ-АН101)	У	3,0	3,0	25	2,0	-	-	50–56			
ПЛ-Нп-300 Х30Г3ТЮ	Ф		3,0	1,0	30	-	0,3	0,2Al	45–50		
ПЛ-Нп-400 Х38Г3РТСЮ		3,0	1,0	38	0,9В; 0,2Al			50–54			

Окончание табл. 4.8

Марка (старое обозначение)	Способ наплавки	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %								Твёрдость наплавленного металла, HRC	Типичные объекты наплавки
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	Mo	прочих		
ПЛ-Нп-450 Х20Б7М6В2Ф (ПЛ-АН179)	С	4,5	-	2,0	20	-	-	6,0	7 Nb; 2 W; 1 V	55–62	Конусы и чаши доменных печей
ПЛ-Нп-500 Х40Н40С2Р (ПЛ-АН111)		5,0	1,0		40	40		-	0,2 В	54–62	
ПЛ-Нп-12Х16 Н9С5Г2Т (ПЛ-АН150)	Ф	0,12	2,0	5,0	18	9	0,2	-	-	27–34	Детали запорной арматуры
ПЛ-Нп-12Х16 Н8М6С5Г4Б (ПЛ-АН151)			4,0		16	8	-	6,0	1 Nb	38–50	
Условные обозначения: Ф – наплавка под флюсом; С – наплавка без дополнительной защиты; У – универсальная											

Таблица 4.9

Характеристики ленты наплавочной спечённой на основе железа
для износостойкой и коррозионно-стойкой стали

Марка	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %								Твёрдость наплавленного металла, HRC	Типичные объекты наплавки
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	прочих		
ЛС-18ХГСА	0,3	0,7	0,9	1,1	-	-	-	0,3 Ti	24–32	Оси, валы
ЛС-70ХЗНМ	1,0	0,4	0,7	4,5	1,0	0,9	-	-	54–60	Детали ходовой части автомобилей, ножи бульдозеров
ЛС-5Х4ВЗФС	0,7		0,5	5,0	-	-	0,7	4 W	42–46	Прокатные валки
ЛС-25Х5ФМС	0,4		0,7	6,2		-	1,5	0,8	-	38–44
ЛС-15Х13	0,22	0,5	0,5	16,5	-	-	-	Плунжеры гидропрессов		
ЛС-12Х13Н2МФА	0,12	0,8	0,6	13,5	1,6	0,8	0,2	0,06 N	38–52	Ролики МНЛЗ
ЛС-02Х20Н11Г	0,025	2,0	0,4	20	11	-	-	-	-	-
ЛС-02Х20Н11Г2Б		1,8		21				0,3 Nb		
ЛС-02Х20Н14М3		1,5		20	13,5			2,5		

4.1.4. Флюсы

Флюсы, применяемые для автоматической наплавки, подобно электродному покрытию способствуют стабилизации дуги, обеспечивают защиту её от окружающего воздуха, протекание химических реакций и выполнения ряда металлургических функций в процессе наплавки.

При наплавке используют флюсы трёх видов: керамические, плавленные и смешанные. Плавленные флюсы, в состав которых входят окислы и фториды, отличаются однородностью и стабильностью структуры, низкой влагопоглощающей способностью. Наплавка высокоуглеродистой и высоколегированной стали с использованием плавленных флюсов отличается высокой технологичностью, выражающейся, в частности, в хорошем отделении шлака при наплавке.

Керамические флюсы, несколько превосходящие плавленные по тугоплавкости, успешно используют для наплавки с большой погонной энергией, а возможность добавления легирующих элементов к этим флюсам создаёт предпосылку их широкого применения для наплавки и сварки коррозионно-стойкой и специальной стали.

Смешанные флюсы (флюсовые смеси) получают путём смешения плавленных и керамических флюсов и порошков сырья разного состава в необходимой пропорции.

В табл. 4.10 представлена область применения некоторых марок флюсов в зависимости от электродных материалов и материалов, на которые наносится наплавка.

Таблица 4.10

Назначение электродных материалов и флюсов

Назначение наплавки	Электродный материал (марка стали)	Флюс
Восстановление изношенных деталей	65Г	АН-60
То же и повышение твёрдости	30ХГСА	АН-348-А
Восстановление размеров изношенных валков прокатных станов перед износостойкой наплавкой	08, 08Г, 10Г2, 15, 15Г, 10ГС	АН-348-III, АН-348-А, ОСЦ-45
То же и наплавка буртов и менее нагруженных калибров без повышения износостойкости	18ХГСА, 40Г, 30ГСА, 45, 60, 60Г	АН-348-А, ОСЦ-45
Восстановление размеров, повышение износостойкости и коррозионной стойкости	2Х13, Х25Н3, Х20, Н10Г6	АН-20, АН-22

4.1.5. Порошковая проволока

Порошковую проволоку получают путём заполнения флюсующими (шлакообразующими и стабилизаторами дуги) и металлическими (легирующими и раскисляющими) порошками тонкостенной металлической оболочки с последующей обработкой её волочением для придания формы проволоки. На рис. 4.2 представлены конструкции наиболее распространённых видов порошковой проволоки.

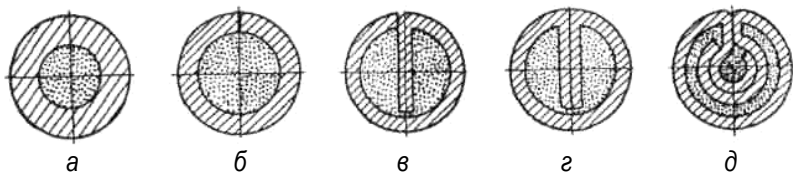


Рис. 4.2. Конструкции порошковой проволоки:

а – бесшовная; б–д – шовная; в, г – с одним и двумя загибами; д – двухслойная

Для автоматической дуговой наплавки под флюсом используют проволоку, сердцевина которой заполнена порошками металлов или сплавов (ферросплавами). При автоматической и полуавтоматической наплавке в среде углекислого газа или открытой дугой применяют проволоку, сердцевина которой содержит раскислители, шлакообразующие компоненты, стабилизаторы дуги и порошки металлов или сплавов.

В табл. 4.11 представлены области применения некоторых марок наплавочной порошковой проволоки в зависимости от условий работы наплавленного слоя.

Таблица 4.11

Рекомендуемые области применения наплавочных порошковых проволок

Условия работы	Рекомендуемые марки проволоки
Абразивный износ	ПП-АН120, ПП-АН126, ПП-АН135, ПП-ИТС-02, ПП-У10Х4Г2Р
Абразивный износ, сопровождающийся большими удельными давлениями и ударными нагрузками	ПП-АН135, ПП-АН125, ПП-АН170, ПП-АН170П
Износ от трения по металлу при больших удельных давлениях	ПП-ТН250, ПП-АН121, ПП-АН105, ПП-АН103,
Износ от трения по металлу при больших давлениях и повышенных температурах. Термическая усталость	ПП-Нп-25Х5ФМС, ПП-АН130, ПП-Нп-3Х2В8, ПП-АН132, ПП-Нп-20Х4В10Н4ФТ, ПП-АН104
Интенсивный износ с ударными нагрузками при повышенных температурах в агрессивных средах	ПП-ИТС-02, ПП-АН106, ПП-АН133, ПП-АН138

Характеристики некоторых марок наплавочной порошковой проволоки по ГОСТ 26101-84 представлены в табл. 4.12.

Таблица 4.12

Характеристики порошковой проволоки для наплавки

Марка (старое обозначение)	Способ наплав- ки	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %								Твёрдость наплавленного металла	Типичные объекты наплавки	
		С	Mn	Si	Cr	Mo	Ti	V	про- чих			
ПП-Нп-14ГСТ (ПП-ТН250)	С	≤ 0,14	0,3– 0,8	0,3– 0,8	-	-	0,2–0,6	-		220–280 НВ	Оси, валы	
ПП-Нп- 18Х1Г1М (ПП-АН120)	Ф	0,14– 0,2	1,2– 1,8	≤ 0,8	1,2– 1,8	0,3– 0,6	-			280–380 НВ		
ПП-Нп- 30Х5Г2СМ (ПП-АН122)	С	0,3– 0,5	1,4– 2,2	0,5– 1,0	4,4– 6,5	0,6– 1,0	0,15– 0,6			49,5–57 HRC	Коленчатые валы, крестовины карданов	
ПП-Нп- 100Х4Г2АР	Ф	0,6– 1,1	1,5– 3,0	1,5– 2,0	3,0– 6,6	-	-			0,15– 0,6 В; 0,2 N	45,5–55 HRC	Катки, натяжные колёса гусеничных тракторов
ПП-Нп- 200ХГР (ПП-АН160)	С	2,2– 2,5	0,6– 1,3	0,9– 1,5	0,2– 0,6		0,1– 0,2			0,07– 0,14 В	41,5–49,5 HRC	Коленчатые валы из высокопроч- ного чугуна

Марка (старое обозначение)	Способ наплавки	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %								Твёрдость наплавленного металла	Типичные объекты наплавки
		C	Mn	Si	Cr	Mo	Ti	V	прочих		
ПП-Нп- 25Х5ФМС	Ф	0,2–0,3	0,4– 0,9	0,8– 1,3	4,7– 6,0	1,0– 1,5	-	0,3–0,6	-	41,5–51,5 HRC	Валки горячей прокатки, ножи, штампы
ПП-Нп- 30Х4В2М2ФС		0,25– 0,4	0,5– 1,2	0,7– 1,2	3,1– 4,5	2,3– 3,4		0,2– 0,7	1,8– 2,5W	47,5–52,5 HRC	
ПП-Нп- 35В9Х3СФ (ПП-3Х2В8)		0,27– 0,4	0,6– 1,1	0,2– 1,0	2,2– 3,5			0,2–0,4	8–10,5 W	42,5–54,5 HRC	
ПП-Нп- 10Х14Т (ПП- АН106)	С	0,1–0,2	0,3– 0,8	0,2– 0,6	13–15		0,1– 0,3	-	-	39,5–47,5 HRC	Плунжеры гидро- прессов
ПП-Нп- 200Х12ВФ (ПП-АН104)	Ф	1,6–2,1	≤ 0,8	≤ 0,4	11–13	-		0,15– 0,35	0,9–1,5 W	41,5–49,5 HRC	Ролики рольгангов, керны клещевых кранов
ПП-Нп- 90Г13Н4 (ПП- АН105)	С	0,7–0,9	13–15	0,1– 0,3	-			-	3,5–4 Nb	160–240 HB	Крестовины стрелочных переводов, литьё из стали Г13Л

Марка (старое обозначение)	Способ наплавки	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %								Твёрдость наплавленного металла	Типичные объекты наплавки	
		C	Mn	Si	Cr	Mo	Ti	V	прочих			
ПП-Нп- 200X15C1ГРТ (ПП-АН103)	С	1,5–2,2	0,8– 1,5	1,0– 2,0	14–20	-	0,2– 0,8	-	0,5–0,8 В	47,5–59 HRC	Детали, работающие в условиях абразивного изнашивания	
ПП-Нп- 250X10Б8С2Т (ПП-АН135)		2,3–3,6	-	1,5– 2,5	8–11		0,5– 1,2		7–12 Nb	51,5–59 HRC		
ПП-Нп- 80X20P3Т (ПП-АН170)		0,5–1,2	≤ 1,0	≤ 1,0	18–23		0,1– 0,8		2,7–3,6 В	59–63 HRC		
ПП-Нп- 10X17Н9С5ГТ (ПП-АН133)	Ф	≤ 0,12	1,0– 2,0	5,0– 6,0	16– 19		0,05 –0,3		7,8–10 Ni	29–35,5 HRC	Детали запорной арматуры	
ПП-Нп- 15X13Н2Г2ВТ (ПП-АН134Г)		По ТУ 05416923.019-97								Головки поршней судовых ДВС		
ПП-Нп- 07X12Н3М2Г2 (ПП-АН163)		По ТУ 05416923.020-97								Валки пильгерстанов, гребные валы		
Условные обозначения: Ф – наплавка под флюсом; С – наплавка без дополнительной защиты												

4.1.6. Карбид вольфрама

Рабочие органы машин, подвергающиеся абразивному изнашиванию при контактировании с грунтом и скальными породами, должны обладать по возможности высокой твёрдостью. Вместе с тем, как известно, повышение твёрдости сопровождается снижением пластичности (вязкости), повышением чувствительности к трещинообразованию и склонности к отколам наплавленного металла. Вязкая матрица с распределёнными в ней чрезвычайно твёрдыми частицами карбида вольфрама обеспечивает рассматриваемому материалу высокую стойкость к абразивному изнашиванию.

Наплавку карбидом вольфрама прежде осуществляли способом газовой сварки, однако в настоящее время преобладает ручная дуговая наплавка покрытыми электродами. При дуговой наплавке, когда наплавочный материал находится в высокотемпературной области горения дуги, происходит частичное разложение карбида вольфрама на углерод и вольфрам, растворение которых в матрице сопровождается образованием двойных карбидов железа и вольфрама, вызывающих снижение вязкости металла.

Карбид вольфрама как наплавочный материал состоит из эвтектики $W_2C + WC$. По уровню твёрдости, превышающей HV 2400, карбид вольфрама превосходит карбиды большинства других металлов.

При добавлении к кобальту 25–30% хрома получают состав, имеющий при температуре 800–900°C область структурных превращений $\alpha \rightarrow \beta$. Крайне малая скорость этих превращений открывает возможность получения сплавов, обладающих высокой стабильностью при повышенных температурах.

Стеллит как сплав, основанный на использовании этой особенности системы Co – Cr, содержит 0,5–3,0% C, 40–60% Co, 25–33% Cr и 3–17% W. Кроме того, в состав этого сплава могут входить никель и молибден.

Стеллит в качестве наплавочного материала изготавливают в виде прутков для газовой наплавки, покрытых электродов и электродов для наплавки в среде инертного газа.

Стеллит обладает высоким уровнем жаропрочности, износостойкости и коррозионной стойкости. Это предполагает его использование для упрочнения ножей, применяемых в целлюлозно-бумажной промышленности, гнёзд выхлопных клапанов двигателей внутреннего сгорания (ДВС), клапанов высокотемпературных систем высокого давления, матриц для экструзионных прессов и т.п. Хорошая обрабатываемость стеллита резанием и высокий уровень твёрдости при температуре 400–750°C предполагают возможность его использования для упрочнения деталей машин, работающих в условиях высокотемпературного нагрева.

При наплавке стеллита поверхность основного металла необходимо тщательно очистить от масла, окалины и других загрязнений. Невысокая

пластичность стеллита не исключает образования в нём трещин, для предотвращения которых следует применять предварительный подогрев изделия и медленное охлаждение после наплавки (в печи под слоем теплоизоляционного материала).

Плавленные карбиды вольфрама (релиты) применяют для особо износостойких наплавов, работающих в условиях абразивного износа с ударными нагрузками. Наплавку проводят восстановительным газовым пламенем, плазмой или в индукторах. Наплавленный слой характеризуется высокой твёрдостью (500–700 НВ) и повышенной склонностью к образованию трещин и пор. Релитовые наплавочные материалы изготавливают по техническим условиям в виде зернового (З) или трубчато-зернового (ТЗ) релита (ТУ 48-42-34-70) и ленточного (АНЛЗ) релита (ТУ 26-02-769-77), каждый из которых может иметь шесть степеней зернистости.

В табл. 4.13 представлены характеристики различных видов релита.

Таблица 4.13

Релитовые наплавочные материалы

Размер зерна, мм	Зерновой, марка	Трубчато-зерновой			Ленточный		
		Марка	Длина, мм	Диаметр, мм	Марка	Ширина, мм	Толщина, мм
2,5–1,6	З-25	ТЗ-25-7	390	7	АНЛЗ-25-9	9	4
1,6–0,9	З-16	ТЗ-16-6		6	АНЛЗ-16-8	8	
0,9–0,63	З-9	ТЗ-9-5		5	АНЛЗ-9-6	6	3
0,63–0,45	З-6	ТЗ-9-4		4	АНЛЗ-6-5	5	2,5
0,45–0,28	З-4	ТЗ-6-4			АНЛЗ-4-5		
0,28–0,18	З-2	ТЗ-4-3			-		

Релитовые наплавочные материалы так же, как и сплавы с большим количеством кобальта, хрома и вольфрама, достаточно широко используются в наплавочных работах, несмотря на их высокую стоимость. Они обладают отличной стойкостью против истирания, жаропрочностью и коррозионной стойкостью, износостойкостью, даже в условиях трения металла о металл без смазки и при работе в области высоких температур. Как правило, сплавы не имеют строго определённого химического состава, поскольку степень растворения твёрдых зёрен карбида зависит от их размеров, температуры и времени пребывания в области критических температур.

Следует отметить особо, что сплавы, содержащие большое количество кобальта, при наплавке склонны к образованию горячих трещин. Поэтому наплавляемые детали перед наплавкой желательно подогреть до 600–700°С.

При наплавке сплавов, содержащих большое количество карбидов, необходимо выбирать режимы, обеспечивающие их минимальное растворение в матричном составе. Такие требования лучше всего обеспечиваются при газовой, индукционной или печной наплавке.

4.1.7. Прутки для наплавки

Литые прутки для наплавки износостойкого слоя на детали, работающие в условиях интенсивного абразивного изнашивания, ударных нагрузок, повышенных температур или агрессивных средах, согласно ГОСТ 21449-75 подразделяют на пять марок (табл. 4.14). Их изготавливают диаметром 4–8 мм и длиной 350–500 мм.

Таблица 4.14

Рекомендуемые области применения износостойких
наплавочных литых прутков

Условия работы	Тип прутка	Марка	Твёрдость наплавки, HRC
Абразивный износ при 500°С	У45Х28Н2СВМ	Пр-С27	52
То же, при 250°С	У30Х28Н4С3	Пр-С1	50
То же, при ударном нагружении	У20Х17Н2	Пр-С2	44
Абразивный износ, эрозия, ударные нагрузки, химически активные среды при 750°С (Пр-ВЗК-Р до 800°С)	У10ХК63В5	Пр-ВЗК	40
	У20ХК57В10	Пр-ВЗК-Р	46

Широкое применение в судостроении и химическом машиностроении находит наплавка прутковыми материалами на основе меди (табл. 4.15).

Таблица 4.15

Прутковые наплавочные материалы из медных сплавов

Материал	Марка прутка	Рекомендуемое применение
Медь	М1Р, М2Р	Электротехническая промышленность, наплавка контактов
Латунь	ЛМц-58-2, ЛЖМц-59-1-1, ЛОК59-1-0,3	Судостроение, детали, подверженные коррозии
Бронза	МнЖКИ5-0,2-0,2	Для работы в морской воде
	2БрАМц9-2	В условиях, где необходима коррозионная износостойкость

4.2. Материалы для износостойкой наплавки, классифицируемые по виду структуры наплавленного металла

4.2.1. Перлитно-сорбитные материалы

Состав перлитно-сорбитных материалов – сталей, включающих небольшие добавки углерода, хрома, ванадия и других легирующих элементов, подбирают с таким расчётом, чтобы после наплавки и охлаждения на воздухе структура наплавленного металла при нормальной температуре состояла преимущественно из перлита или сорбита.

Состав перлитных материалов (Нп-25, Нп-20ХГСА, Нп-90ХГСА и др.) обеспечивает, в зависимости от скорости охлаждения наплавки, перлитно-сорбитную структуру. Твёрдость наплавленного металла находится на уровне 25–40 HRC, износостойкость значительно уступает мартенситной структуре, поэтому сопротивление износу при трении невысоко. Наплавочные материалы этого класса часто применяют для создания «подслоя», на который наплавливают слой повышенной твёрдости.

4.2.2. Мартенситные материалы

Мартенситными называют наплавочные материалы, обеспечивающие образование мартенситной структуры в состоянии после наплавки. Мартенсит как структура закалки является одним из самых твёрдых структурных образований в стали, обладает высокой стойкостью при абразивном (песок, гравий) изнашивании и задирации. Вместе с тем мартенситный металл, будучи хрупким, склонен к образованию трещин. Следует также учитывать, что наплавленный слой, полученный с помощью мартенситных наплавочных материалов, при работе в условиях ударно-динамической нагрузки склонен к отрыву от основного металла.

Низколегированные мартенситные материалы (Нп-40Х3Г2МФ, Нп-40Х2Г2М, Нп-50Х6ФМС и др.), содержание легирующих элементов в которых относительно невысоко, обеспечивают в наплавке мартенситно-бейнитные структуры и отличаются сравнительно небольшой твёрдостью (45–50 HRC). Свойства наплавки повышаются, в основном, с увеличением содержания в ней углерода и хрома, что приводит к соответствующему возрастанию доли мартенситной составляющей.

Твёрдость наплавленного металла снижается при повышении температуры его разогрева в процессе наплавки и снижении скорости охлаждения после наплавки.

Низколегированные мартенситные материалы обычно не склонны к вторичному твердению и существенно снижают свою твёрдость при отпуске. Аналогичный эффект обнаруживается при многослойной наплавке.

Вследствие образования мартенситной структуры твёрдость наплавленного металла вблизи поверхности может достигать высоких значений,

однако по мере приближения к основному металлу она снижается из-за отпуска, вызываемого термическим воздействием процесса многослойной наплавки. Снижение твёрдости выявляется с особой отчётливостью при дуговой наплавке под флюсом и других способах, отличающихся большой погонной энергией. Если наплавочный материал, кроме хрома, содержит молибден, ванадий, вольфрам и другие карбидообразующие элементы, то вследствие образования двойных карбидов происходит вторичное твердение наплавленного металла.

Явление вторичного твердения используют в технологических процессах изготовления инструмента для горячего деформирования металла и прокатных валков.

Наплавленный металл при относительно низкой твёрдости отличается малой чувствительностью к образованию трещин, но по мере повышения доли мартенсита в структуре увеличивается хрупкость металла и снижается его трещиностойкость. Поэтому при наплавке среднеуглеродистых и высокоуглеродистых сталей необходимо применять меры для предотвращения образования трещин, включая нанесение подслоя из металла с более высокой вязкостью, повышение температуры разогрева металла наплавки путём предварительного подогрева и др.

Рассматриваемые наплавочные материалы, обладающие относительно низкой твёрдостью и повышенной вязкостью, могут быть предназначены для деталей, работающих в условиях трения поверхностей под высокой нагрузкой и динамического изнашивания (трения с ударно-динамической нагрузкой). Увеличение доли мартенсита в структуре наплавленного металла сопровождается повышением его стойкости к абразивному изнашиванию.

Значительно большей твёрдостью характеризуются борсодержащие мартенситные материалы наплавки (ПП-АН125, ПП-АН170, ПЛУ-25Х25ГЗФ2РН, ЛС-У10Х7ГР1), в структуре которых по границам высокоуглеродистого мартенсита расположены твёрдые карбиды и бориды. Материал отлично сопротивляется абразивному износу, задирам, но из-за повышенной хрупкости не может быть рекомендован для работы в условиях динамических нагрузок. Наплавка имеет повышенную склонность к образованию горячих и холодных трещин, поэтому ведут её, как правило, с подогревом и применением одного или нескольких подслоев. Отпуск в результате наложения нескольких слоёв практически не снижает твёрдости.

На участках действия динамической нагрузки наплавку борсодержащим мартенситным материалом следует исключать из-за опасности отрыва наплавленного металла от основного.

При высоком содержании карбидов и боридов происходит некоторое самоупрочнение наплавленного металла, твёрдость которого мало зависит от скорости охлаждения при наплавке.

Мартенситные хромистые материалы типа Нп-30Х13 после наплавки имеют, в основном, мартенситную структуру с небольшим содержанием феррита. Износостойкость наплавки повышается с увеличением количества углерода. Низкоуглеродистые наплавки помимо достаточной износостойкости обладают повышенной жаростойкостью и антикоррозионными свойствами. С увеличением содержания углерода (Э-120Х12Г2СФ) в структуре появляется ледебуритная составляющая, что резко повышает износостойкость наплавки и делает её пригодной для наплавки режущих кромок инструмента.

4.2.3. Аустенитно-мартенситные материалы

Для обеспечения повышенной сопротивляемости к задирам применяют наплавочные материалы, содержащие в своей структуре наряду с мартенситом значительное количество аустенитной фазы (Нп-50Х6ФМС, Нп-30Х5).

Аустенитно-мартенситные материалы при высоком содержании остаточного аустенита обеспечивают наплавленный металл низкой твёрдости и высокой вязкости даже при высоком содержании легирующих элементов. Такая структура уступает мартенситу по стойкости к абразивному изнашиванию и эрозии, но превосходит его по противозадирной стойкости.

Наплавленный металл, полученный с использованием аустенитно-мартенситных материалов, испытывает вторичное твердение при температуре отпуска 500–600°С. Эту особенность аустенитно-мартенситных наплавочных материалов используют для упрочнения изделий, работающих при высоких температурах (например, валки станов горячей прокатки).

4.2.4. Аустенитные материалы

Высокомарганцовистые аустенитные материалы содержат 1,2% С и 13% Мп. Эти стали обычно наплавляют на детали, работающие в условиях интенсивной ударно-динамической нагрузки, поскольку такой наплавленный слой придаёт деталям высокую стойкость к динамическому изнашиванию.

Материалы типа Нп-Г12А при резком охлаждении от температуры 1000°С образуют аустенитную структуру с повышенной вязкостью и пластичностью. Длительная выдержка при температуре выше 400°С приводит к выделению по границам зёрен карбидов и вторичной перлитной фазы, снижающих пластичность. Уменьшение содержания углерода снижает вероятность образования вторичных фаз. В зоне сплавления основного низкоуглеродистого или низколегированного металла наплавки возможно образование хрупкой мартенситной прослойки и появление трещин. Для предотвращения их рекомендуют применение промежуточного слоя из хромисто-марганцовистой наплавки типа Нп-30Х10Г10Т.

Значительное преимущество высокомарганцовистого аустенитного наплавочного материала связано с его сильным механическим упрочне-

нием (наклёпом) под действием ударной нагрузки. Поэтому его с успехом используют при упрочнении деталей, работающих в условиях изнашивания при динамической нагрузке.

При использовании высокомарганцовистых аустенитных материалов мартенситная структура наплавленного металла образуется даже при наплавке на низкоуглеродистую и низколегированную сталь. Наплавочные материалы этой группы с низким содержанием углерода широко используют при сварке рельсов, а также для наплавки подслоя на детали из высокомарганцовистой стали. В состоянии после наплавки твёрдость металла составляет HV 150–350. Способность к сохранению твёрдости при высокой температуре предполагает применение наплавочных материалов этой группы для износостойкой наплавки деталей металлургического оборудования, в частности ножниц для горячей резки металла, работающих при ударной нагрузке в условиях высоких температур, а также рабочих органов дробилок различного назначения.

Высокохромистые наплавочные материалы на основе железа типа Э-300Х28Н4С4, Э-320Х25С2ГР позволяют получать структуру, матрица которой состоит из аустенита с вкраплениями мелкодисперсных частиц карбида бора и хрома, придающих наплавке высокую твёрдость. Поскольку твёрдость, в основном, определяется количеством карбидов, она практически не изменяется в процессе нагрева и не зависит от скорости охлаждения. Тем не менее, наплавку следует проводить при предварительном подогреве деталей до температуры 400–500°С, чтобы избежать появления горячих трещин, а также уменьшить скорость охлаждения.

Добавки ниобия, вольфрама, молибдена и других карбидообразователей способствуют большему повышению твёрдости и появлению способности наплавки к вторичному твердению; износостойкость при этом повышается.

4.3. Коррозионно-стойкие наплавочные материалы

В качестве коррозионно-стойких наплавочных материалов применяют коррозионно-стойкие сталь, никель, медь и их сплавы.

4.3.1. Коррозионно-стойкая сталь

Обычно наплавка проводится на изделиях из хромистых или хромо-никелевых аустенитных сталей.

Ферритная коррозионно-стойкая наплавка обеспечивается при высоком содержании хрома и весьма низком содержании углерода, структура феррита сохраняется в широком диапазоне температур. Содержание хрома, при котором сталь приобретает полностью ферритную структуру, зависит от содержания углерода и азота, а также марганца и других элементов, способствующих образованию аустенита. Для высокочистых

сплавов системы железо – хром (0,004% С, 0,002% Ni) такое содержание хрома составляет 11,5%.

Ферритная сталь не имеет структурных превращений при высокой температуре, но её выдержка при этой температуре сопровождается укрупнением кристаллического зерна и охрупчиванием стали. Наплавки этого типа в отношении к общей коррозии существенно уступают аустенитным, но превосходят последние по стойкости к коррозионному растрескиванию под напряжением. При выборе наплавочного материала следует иметь в виду, что увеличение содержания углерода и азота, а также микродобавок кобальта, никеля и меди снижает стойкость ферритной стали к коррозионному растрескиванию под напряжением.

Технологические свойства аустенитной наплавки достаточно высоки. Аустенитная коррозионно-стойкая сталь значительно превосходит ферритную сталь по сварочно-технологическим свойствам. Однако при наплавке на стали мартенситного класса следует опасаться появления холодных трещин в зоне сплавления. Для предотвращения охрупчивания аустенитного наплавленного металла принимают меры, противоположные соответствующим мерам для ферритной стали: снижают температуру предварительного подогрева и температуру разогрева металла при наплавке (ниже 150°C). Превышение этой температуры может привести к замедленному охлаждению наплавки и её охрупчиванию.

4.3.2. Никель и его сплавы

Типичными наплавочными материалами этой группы являются чистый никель, монель-металл, сплавы «инконель» и «хастеллой».

Коррозионно-стойкая сталь пригодна только для работы в окислительных средах, не содержащих хлоридов. Тогда как никелевые сплавы обладают коррозионной стойкостью в щелочах, а монель-металл и сплав «хастеллой В» отличаются стойкостью в серной и других неокислительных кислотах.

Коэффициент линейного расширения никелевых сплавов близок к соответствующему коэффициенту для низкоуглеродистой стали, что позволяет проводить наплавку без предварительного подогрева. Для предотвращения образования пор при наплавке никелем и монель-металлом в состав наплавочных материалов следует вводить титан и алюминий. Одна из проблем наплавки никелем и его сплавами связана с образованием в сварных швах горячих трещин, что требует снижения содержания фосфора, серы и других вредных примесей в наплавочных материалах.

Следует особо отметить, что при чрезмерном содержании алюминия возникает опасность растрескивания металла. Для предотвращения горячих трещин, возникающих при наплавке «инконеля» под влиянием кремния, в состав наплавочного материала рекомендуется вводить ниобий и тантал.

В табл. 4.16 представлены характеристики некоторых наплавочных сплавов на основе никеля.

Таблица 4.16

Типичные наплавочные сплавы на основе никеля

Сплав	Примерный состав, %					Характеристика
	Ni	Cu	Mo	Cr	Fe	
Никонель	99	-	-	-	-	Устойчив в едком натре и щелочах
Монель-металл	70	30	-	-	-	Устойчив в морской воде, серной кислоте и едком натре
«Инконель»	75	-	-	15	10	Устойчив к коррозионному растрескиванию под напряжением, в воде при высоких температурах и давлениях
«Хастеллой В»	65	-	30	-	5	Устойчив в соляной кислоте и к окислению при высокой температуре
«Хастеллой С»	65	-	15	15	5	

4.3.3. Медь и её сплавы

Типичными наплавочными материалами этой группы являются чистая медь, бронзы, латуни и медно-никелевый сплав. В табл. 4.17 представлены характеристики некоторых наплавочных сплавов на основе меди.

Таблица 4.17

Типичные наплавочные сплавы на основе меди

Сплав	Примерный состав							Характеристика
	Cu	Zn	Sn	Al	Ni	Si	Fe	
Медь	99,9	-	-	-	-	-	-	Электроды и т.п.
Бронза кремнистая	96	-	-	-	-	3	-	Устойчива в морской воде и кислотах (кроме азотной)
Бронза алюминиевая	92	-	-	8	-	-	-	Устойчива в морской воде, износоустойчива
Бронза адмиралтейская	88	-	-	8	2	-	2	-

Сплав	Примерный состав							Характеристика
	Cu	Zn	Sn	Al	Ni	Si	Fe	
Латунь	70	30	-	-	-	-	-	-
Латунь судостроительная	60	39	1	-	-	-	-	-
Латунь алюминиевая	80	18	-	2	-	-	-	-
Медно-никелевый сплав	70	-	-	-	30	-	-	Устойчив в морской воде

5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАПЛАВКИ. ОСНОВНОЙ МЕТАЛЛ. СВАРИВАЕМОСТЬ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА. РОЛЬ СРЕДЫ ПРИ НАПЛАВКЕ. ПОГОННАЯ ЭНЕРГИЯ И СКОРОСТЬ ОХЛАЖДЕНИЯ. РЕЖИМЫ НАПЛАВКИ. ДОЛЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА В МЕТАЛЛЕ НАПЛАВКИ. ТЕРМООБРАБОТКА ПОСЛЕ НАПЛАВКИ

5.1. Основной металл

Наплавке подвергают основной металл самых разнообразных классов и видов.

Углеродистые и низколегированные стали обладают вполне удовлетворительной пластичностью и вязкостью, однако высокий уровень их углеродного эквивалента требует применения при наплавке предварительного подогрева как средства предотвращения образования в них трещин.

Высокомарганцовистая аустенитная сталь содержит 0,9–1,3% С и 11–14% Mn. Низкая теплопроводность этой стали и высокий коэффициент линейного расширения (в 1,5 раза больше, чем для низкоуглеродистой стали) создают опасность растрескивания при наплавке.

При большом разнообразии составов коррозионно-стойкой стали по структурному признаку её можно разделить на пять групп: аустенитная, мартенситная, ферритная, аустенитно-ферритная, дисперсионно-упрочняемая.

Аустенитная коррозионно-стойкая сталь обладает высокими сварочно-технологическими свойствами, однако она склонна к деформации при сварке, поскольку её коэффициент линейного расширения в 1,5 раза больше, а теплопроводность в три раза меньше, чем для низкоуглеродистой стали. Для предотвращения охрупчивания рекомендуется снижать температуру её предварительного подогрева и разогрева (между проходами).

Мартенситная коррозионно-стойкая сталь, обладая высокой закаливаемостью, отличается низкой свариваемостью. При высоком содержании углерода сварка этой стали становится невозможной из-за интенсивного растрескивания.

Ферритная коррозионно-стойкая сталь, не склонная к закалке при охлаждении на воздухе, может подвергаться сварке, однако из-за склонности к охрупчиванию по причине укрупнения кристаллического зерна при температуре выше 900°C при наплавке этой стали происходит охрупчивание зоны термического влияния, которое, однако, можно предотвратить путём предварительного подогрева (100–200°C) и ограничения погонной энергии. Во время длительной выдержки при температуре 400–500°C эта сталь подвергается охрупчиванию (при 475°C), что выражается в значительном снижении относительного удлинения металла при нормальной температуре.

5.2. Свариваемость основного металла

5.2.1. Понятие свариваемости

При сварке углеродистой и низколегированной стали углеродный эквивалент (C_3) используют как показатель, выражающий свариваемость.

$$C_3 = C + 1/6Mn + 1/24Si + 1/40Ni + 1/5Cr + 1/4Mo + 1/14V,$$

где C , Mn , Si и т.д. – содержание химических элементов в стали, %.

При $C_3 \geq 0,4\%$ возможно образование трещин в таком металле.

В зоне, примыкающей к наплавленному слою, происходит изменение свойств основного металла под влиянием теплоты процесса наплавки. В этой зоне, называемой зоной термического влияния, металл имеет максимальную твёрдость и наибольшую чувствительность к трещинам. Повышение углеродного эквивалента основного металла сопровождается максимальным повышением твёрдости в зоне термического влияния. Поэтому при наплавке углеродистой и низколегированной стали углеродный эквивалент служит показателем для оценки сварочных свойств основного металла, а также для выбора режима предварительного подогрева.

Между углеродным эквивалентом и максимальной твёрдостью в зоне термического влияния существует практически линейная зависимость, выражаемая уравнением, выведенным для случая наплавки листа толщиной 20 мм покрытыми электродами диаметром 4 мм ($I = 170$ А, $v_H = 15$ см/мин).

$$H_{\max} = (660C_3 + 40) \pm 40,$$

где H_{\max} – максимальная твёрдость в зоне термического влияния по Виккерсу (нагрузка 100 Н); C_3 – углеродный эквивалент.

При наплавке в большинстве случаев проблему составляет предотвращение образования горячих трещин, механизм возникновения которых состоит в следующем. Во время кристаллизации наплавленного металла на границах кристаллического зерна образуется легкоплавкий расплав (эвтектика), наличие которого на границах зерна становится причиной разрушения металла под влиянием усадочной деформации. Для оценки чувствительности к горячим трещинам Уилкинсон предложил показатель Н.С.С. (склонность к горячим трещинам), рассчитываемый по уравнению

$$H.C.S. = \frac{C(S + P + Si / 25 + Ni / 100)}{3Mn + Cr + Mo + V} \cdot 10^3,$$

где C, S, P и т.д. – содержание химических элементов в стали, %.

При $H.C.S. < 1,7$ трещины не возникают. Условием возникновения горячих трещин при наплавке является $H.C.S. > 2$ (при обычной сварке низколегированной стали трещины начинают возникать при $H.C.S. > 4$).

5.2.2. Состав и твёрдость наплавленного металла

Основной металл оказывает существенное влияние на состав и твёрдость наплавленного металла. В частности, составы, например, первого и второго слоёв отличаются друг от друга, что проявляется в твёрдости этих слоёв.

Состав n -го слоя наплавленного металла можно рассчитать по уравнению

$$C_w = C_f + (P / 100)^n \cdot (C_p - C_f),$$

где C_w – содержание элемента в n -м слое наплавленного металла, %; C_f – содержание элемента в неразбавленном металле, %; C_p – содержание элемента в основном металле, %; P – степень проплавления, %.

$$P = [A / (A + B)] \cdot 100,$$

где A – площадь наплавленного металла по сечению валика, мм^2 ; B – площадь участка проплавления основного металла по сечению валика, мм^2 .

5.2.3. Структурная диаграмма Шеффлера

При наплавке коррозионно-стойкой стали на низкоуглеродистую и низколегированную сталь структура наплавленного металла может быть определена с помощью диаграммы Шеффлера (рис. 5.1). Линии с косыми штрихами на рисунке ограничивают области возникновения трещин или охрупчивания под влиянием термообработки. Следовательно, материалы

и режим наплавки необходимо выбирать с ориентацией на треугольную область диаграммы Шеффлера, ограниченную значениями хромового эквивалента в пределах 18–24% и никелевого эквивалента в пределах 7–18%.

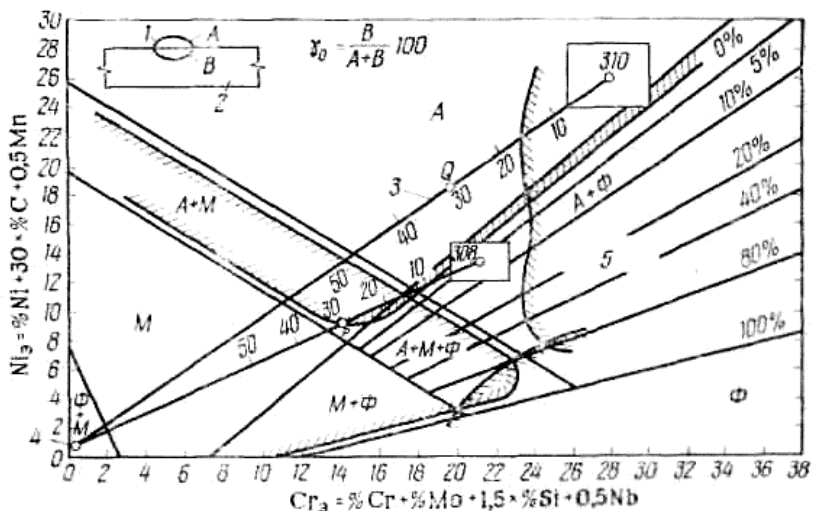


Рис. 5.1. Структурная диаграмма Шеффлера:

- 1 – валик; 2 – основной металл; 3 – линия, отражающая разбавление наплавляемого металла основным; 4 – низкоуглеродистая сталь; 5 – область охрупчивания, образования σ -фазы; M – мартенсит, холодные трещины при температуре ниже 400°C (необходим предварительный подогрев); A – аустенит, горячие трещины при 1250°C; Φ – феррит, укрупнение кристаллического зерна и охрупчивание при температуре выше 1150°C, повышение чувствительности к надрезам при нормальной температуре

5.2.4. Переход углерода

Важнейшая проблема, возникающая при наплавке коррозионно-стойкой стали на низколегированную сталь, состоит в том, что при последующей длительной термообработке на границе между основным и наплавленным металлом образуется хрупкий науглероженный слой. Он становится причиной возникновения трещин при испытаниях на боковой изгиб.

Возникновение науглероженного слоя связано с диффузией углерода из состава основного металла в наплавленный металл, имеющий в составе элементы с большим химическим сродством к углероду.

Это обусловлено большой разностью по содержанию углерода между основным и наплавленным металлом, а также по содержанию в них карбидообразующих элементов (хрома, титана, ниобия). Содержание углерода в граничном науглероженном слое, зависящее от режима термообработки, состава основного и наплавленного металлов, часто превышает 2%.

5.3. Роль среды при наплавке

5.3.1. Газовая наплавка

В зависимости от состава горючей смеси ацетиленокислородное пламя может быть науглероживающим, восстановительным (или нормальным) и окислительным.

Газовую наплавку стеллита и других материалов осуществляют обычно науглероживающим пламенем, хотя иногда, в частности при наплавке сплавом колмоной (система Ni – Cr – В – Si), используют нормальное пламя, а при наплавке латуни или кремнистой бронзы (наплавку осуществляют с использованием флюса) необходимо применение даже слегка окисленного пламени.

Повышение содержания углерода в наплавленном металле за счёт его осаждения на поверхности при газовой наплавке вызывает снижение коррозионной стойкости, относительного удлинения и других механических свойств.

5.3.2. Дуговая наплавка

При дуговой наплавке покрытыми электродами или автоматической наплавке под флюсом электродное покрытие или флюс превращается в шлак, химическое взаимодействие которого с металлом ванны обеспечивает его рафинирование, кроме того, шлак защищает ванну от загрязнения окружающим воздухом.

Рафинирующая способность шлака зависит от основности.

$$\text{Основность} = \frac{\text{CaO(моль\%)} + \text{MgO(моль\%)} + \text{MnO(моль\%)}}{\text{SiO}_2(\text{моль\%}) + \text{Al}_2\text{O}_3(\text{моль\%})}$$

По результатам расчёта с использованием приведённого уравнения можно выделить три группы флюсов: основные, нейтральные и кислые. Флюсы с основностью ~ 1 относятся к нейтральным флюсам, с основностью > 1 – к основным, с основностью < 1 – к кислым.

Основные флюсы образуют шлак с сильной раскислительной способностью, обеспечивают получение наплавленного металла с незначительным содержанием примесей при хорошем выходе по углероду, марганцу и хромю. Кислые флюсы с высоким содержанием двуокиси кремния обеспечивают повышение содержания кремния в наплавленном металле, восстанавливаемого в процессе наплавки из кремнезёма шлака. Вместе с тем кислые флюсы, обеспечивая образование шлака оптимальной вязкости, улучшают внешний вид наплавленного валика. Преимущество кислых флюсов связано с уменьшением содержания диффузионного водорода в наплавленном металле.

Кроме рафинирования металла и влияния на формирование валика роль шлака состоит в предотвращении чрезмерно быстрого охлаждения наплавленного металла, в обеспечении его отжига.

5.4. Погонная энергия и скорость охлаждения

Погонную энергию при сварке (наплавке) обычно рассчитывают по уравнению

$$J = 60IU_D / v, z,$$

где J – погонная энергия, Дж/см; U_D – напряжение на дуге, В; I – сила тока, А; v – скорость сварки (наплавки), см/мин.

В табл. 5.1 представлены характеристики различных способов наплавки.

Таблица 5.1

Погонная энергия наплавки разными способами

Наплавка	Режим наплавки			Погонная энергия, Дж/см
	I , А	U_D , В	v , см/мин	
Дуговая покрытыми электродами диаметром 4 мм	170	27	15	18000
Полуавтоматическая: - сплошной проволокой диаметром 1,6 мм	400	25	40	15000
- порошковой проволокой диаметром 3,2 мм	400	26	40	16000
Автоматическая под флюсом: - электродной проволокой	500	30	30	30000
- ленточным электродом	800	25	18	67000

После наплавки при большей энергии охлаждения металла происходит медленнее.

5.5. Режимы наплавки

5.5.1. Прокалка наплавочных материалов

Возникновение холодных трещин в наплавленном металле и зоне термического влияния связано обычно с тремя причинами:

- 1) с высокой твёрдостью наплавленного металла;
- 2) с жёстким закреплённым состоянием наплавленного участка поверхности детали, исключающей релаксацию напряжений в металле за счёт пластической деформации;
- 3) с водородной хрупкостью, возникающей под действием диффузионного водорода.

Влажность наплавочных материалов частично включает остаточную кристаллизационную воду, однако, основная её часть приходится на водяные пары, поглощаемые из окружающего воздуха.

Если после проковки наплавочные материалы длительное время не применяют, то непосредственно перед наплавкой их необходимо подвергнуть повторной проковке.

В табл. 5.2 представлены режимы повторной термообработки наплавочных материалов перед наплавкой.

Таблица 5.2

Температура проковки наплавочных материалов

Наплавочные материалы	Температура сушки, °С, в течение 1 ч
Электроды с покрытиями:	
– высокорутиловым	80–120
– карбонатно-рутиловым	200–250
– основным	300–350
– покрытием, содержащим графит	150–200
Порошковая проволока с флюсовой сердцевинкой	250–350
Керамический флюс	250–300
Плавленый флюс	250–400

5.5.2. *Обработка поверхности перед наплавкой*

Для получения качественного наплавленного слоя поверхность детали перед наплавкой рекомендуется подвергать зачистке с целью полного удаления различных загрязнений (влаги, масла, пыли, ржавчины), а также возможных дефектов в виде трещин, следов износа, упрочнённых слоёв и др.

5.5.3. *Предварительный нагрев*

Недостаточная температура предварительного подогрева создаёт опасность возникновения трещин, а чрезмерный нагрев вызывает снижение скорости охлаждения и увеличение глубины проплавления основного металла, что не обеспечивает требуемой твёрдости наплавленного металла.

5.5.4. *Газовая наплавка*

Газовая наплавка стеллита предполагает выполнение следующих правил:

- 1) необходим предварительный подогрев детали до заданной температуры (табл. 5.3), а для крупных изделий – подогрев с обратной стороны, чтобы во время наплавки поддерживать температуру основного металла 400–500°С;
- 2) наплавляемая поверхность должна находиться по возможности в точном горизонтальном положении;
- 3) наплавку необходимо выполнять науглероживающим пламенем при поддержании расстояния между ядром пламени и основным металлом ~3 мм в условиях запотевания поверхности основного металла;

- 4) во избежание перегрева наплавлять следует более широким, но коротким пламенем, чем при газовой сварке;
- 5) подачу наплавочного металла и его плавление следует начинать после запотевания поверхности основного металла;
- 6) расплавляемый конец присадочного прутка необходимо держать ближе к поверхности ванны, но без ввода внутрь ванны;
- 7) для обеспечения хорошего растекания по поверхности основного металла прутки рекомендуется держать в определённом положении без изменения угла наклона и поворачивания его в разные стороны;
- 8) наплавку осуществляют обычно при перемещении сопла горелки вперёд, как показано на рис. 5.2.

Таблица 5.3

Сила тока и температура предварительного подогрева деталей при дуговой наплавке покрытыми электродами

Наплавочные материалы	Сила тока, А, в зависимости от диаметра электрода, мм				Температура предварительного подогрева, °С
	3,2	4	5	6	
Коррозионно-стойкая сталь:					
– аустенитная	70–115	95–160	135–230	160–280	–
– ферритная	70–115	90–145	130–180	160–210	100–400
Никель и его сплавы:					
– никель	75–120	90–160	180–200	190–230	–
– инконель	70–120	90–145	115–180	–	≥ 120
– монель-металл	75–120	100–150	140–190	190–230	≥ 100
Медь и её сплавы:					
– медь	70–100	110–160	140–230	170–270	280–600
– бронза	60–110	100–150	150–200	190–230	-
– медно-никелевый сплав	90–120	130–160	160–200	220–260	≥ 150
Материалы для износостойкой наплавки:					
– стеллит	85–110	120–170	150–210	200–280	300–500
– перлитная сталь	60–130	110–180	160–240	200–300	≥ 150
– мартенситная сталь	90–160	140–190	180–240	220–310	≥ 150
– марганцовистая аустенитная сталь	70–140	95–180	130–240	220–300	–
– высокохромистые на основе железа	100–130	110–180	150–180	190–240	≥ 150
– карбид вольфрама	70–90	100–120	130–170	150–200	≥ 300

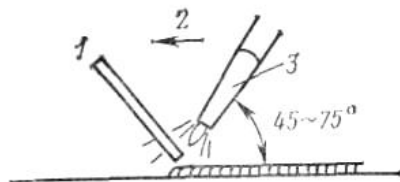


Рис. 5.2. Схема наплавки газовым пламенем с перемещением сопла горелки углом вперед:
1 – наплавочный пруток; 2 – направление наплавки; 3 – сопло горелки

5.5.5. Дуговая наплавка покрытыми электродами

Дуговую наплавку покрытыми электродами осуществляют различными материалами, требующими разной скорости охлаждения наплавленного металла. В частности, при наплавке мартенситных материалов, стеллита и карбида вольфрама, предпочтительно замедленное охлаждение, а при наплавке аустенитной коррозионно-стойкой стали, чистого никеля, фосфористой бронзы и высокомарганцовистого аустенитного материала наплавленный металл рекомендуется охлаждать с высокой скоростью. В первом случае перед наплавкой проводят предварительный подогрев (см. табл. 5.3), тогда как во втором случае необходимость подогрева отпадает, а наплавку рекомендуется осуществлять узкими валиками при малой силе тока.

5.5.6. Дуговая наплавка в среде CO_2

Дуговую наплавку в среде CO_2 осуществляют с использованием наплавочной проволоки диаметром 1,2 мм при оптимальной силе тока 80–300 А, а проволоки диаметром 1,6 мм при оптимальной силе тока 200–500 А. При неизменной силе тока увеличение вылета электродной проволоки требует повышения скорости её подачи (или производительности наплавки), уменьшая глубину проплавления основного металла. При этом эффективность газовой защиты снижается. При обычном расходе защитного газа (20 л/мин) нормальная длина вылета электрода составляет 20 мм.

5.5.7. Наплавка под флюсом электродной проволокой

Наплавка под флюсом электродной проволокой отличается высокой скоростью и производительностью процесса, в частности при непрерывной наплавке прокатных валков и других тел вращения. При наплавке таких деталей необходимо смещать дугу (электродную проволоку) относительно зенита детали в направлении, противоположном её вращению (рис. 5.3). Величина опережения дуги влияет на внешний вид наплавленного валика (рис. 5.4).

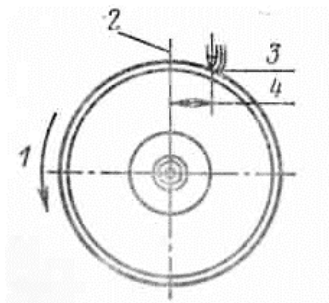
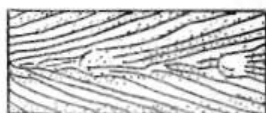


Рис. 5.3. Схема наплавки валика:

1 – направление вращения; 2 – вертикальная ось сечения валика;
3 – сварочная дуга; 4 – смещение (опережение) дуги относительно зенита детали



а



б



в

Рис. 5.4. Влияние опережения на внешний вид наплавленного валика:
а – малое; б – нормальное; в – большое

Увеличение вылета электрода приводит к повышению производительности наплавки и снижению глубины проплавления основного металла. Однако учитывая, что стабильность горения дуги и переход легирующих элементов в наплавленный металл в результате выгорания и окисления их шлаком снижаются, не рекомендуется наплавка при чрезмерно большом вылете электрода.

5.5.8. Наплавка под флюсом ленточным электродом

Этот высокопроизводительный способ широко используется для нанесения антикоррозионных покрытий на внутренние поверхности крупногабаритных сосудов высокого давления, применяемых в нефтеперерабатывающей промышленности и атомной энергетике.

Слой металла, наплавленный с помощью ленточного электрода, должен удовлетворять следующим требованиям:

1. ровная и гладкая поверхность валика при равномерной толщине наплавленного слоя;
2. хорошая укладка наплавленных валиков без подрезов и наплывов на концевых участках;
3. отсутствие дефектов в наплавленном металле при глубине проплавления основного металла не менее 0,5 мм и малой степени разбавления наплавленного металла, доля которого для первого слоя не должна превышать 15%.

В интересах повышения производительности процесса предпочтительна большая сила тока, однако при этом возрастает влияние основного металла на состав наплавленного слоя, а также увеличивается краевой угол смачивания. Повышение напряжения дуги вызывает снижение влияния основного металла на состав наплавленного металла.

Наклон поверхности в направлении наплавки или в поперечном направлении на угол более 3° приводит к неудовлетворительному формированию валика и увеличению степени проплавления основного металла. Таким образом, при наплавке ленточным электродом предельно допустимый угол наклона наплаваемой поверхности детали составляет 3° . Оптимальный вылет электрода составляет 20–45 мм.

5.6. Доля основного металла в металле наплавки

Толщина наплавленного металла, образованного одним или несколькими слоями, может быть различной: 0,5–10 мм и более.

Необходимые свойства металла наплавленного слоя зависят от его химического состава, который, в свою очередь, определяется составом основного и дополнительного металлов и долями их участия в образовании шва. Влияние разбавления слоёв основным металлом тем меньше, чем меньше доля основного металла в формировании слоя (γ_0). В связи с этим для случаев (их большинство), когда желательно иметь в наплавленном слое состав, максимально приближающийся к составу наплаваемого металла, необходимо стремиться к минимальному проплавлению основного металла, т.е. к уменьшению γ_0 .

При многослойной наплавке состав каждого слоя различен, так как различна доля участия основного металла (на который наплавляют) в образовании наплавленного слоя. Если при наплавке 1-го слоя основной металл непосредственно участвует в формировании шва, то при наплавке 2-го и последующих слоёв он участвует косвенно, определяя состав предыдущих слоёв.

Различные дуговые методы наплавки отличаются друг от друга тепловой подготовкой основного и наплаваемого металлов. Так, например,

при плазменной наплавке с токоведущей присадочной проволокой тепло-вложение преимущественно осуществляют в присадочную проволоку, основной металл подогревается достигающими его поверхности, остывающими потоками плазмы дуги и теплотой перегретого жидкого наплавляемого металла. Проплавление основного металла в этом случае может быть уменьшено.

Наоборот, при дуге прямого действия, когда на основном металле располагается катодное пятно дуги, ограничить расплавление основного металла значительно труднее, особенно при значительном сосредоточении дугового разряда (уменьшении диаметра плавящегося электрода, увеличении плотности тока в электроде). Рассредоточение тепловложения в основной металл, например, при ленточном электроде, когда дуга перемещается по торцу ленты от одного конца к другому и иногда возникает одновременно в нескольких местах, может заметно снизить долю расплавляемого основного металла.

При ручной дуговой наплавке покрытыми электродами, а особенно при механизированной наплавке плавящейся электродной проволоки в среде защитных газов или под флюсом, доля основного металла в наплавленном слое γ_0 , как правило, не может быть, без опасности получения непровара, снижена менее чем до 0,2.

Естественно, что γ_0 также зависит от свойств основного и наплавляемого металлов, в частности от их температуры плавления. Например, дуговая наплавка покрытыми электродами, обеспечивающими наплавленный металл типа алюминиевой бронзы ($T_{пл} = 1000^\circ\text{C}$), на низкоуглеродистую сталь, даёт меньшую долю γ_0 , чем показано на рис. 5.5 для того же способа наплавки, но высоколегированной стали ($T_{пл} = 1420^\circ\text{C}$). Определённую роль в этом снижении γ_0 играет и увеличение коэффициента наплавки α_n (г/А·ч), который при электродах из высоколегированной стали составляет ~ 13 (г/А·ч), а при бронзовых электродах ~ 18 (г/А·ч).

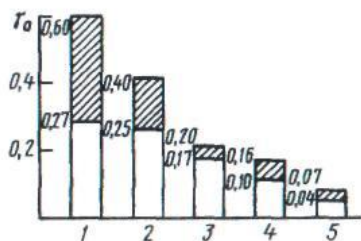


Рис. 5.5. Доля основного металла в первом слое наплавки (хромоникелевая аустенитная сталь), выполненной различными способами на обычных режимах:

- 1 – автоматическая под флюсом; 2 – ручная дуговая покрытыми электродами;
- 3 – автоматическая под флюсом с дополнительной присадочной проволокой;
- 4 – автоматическая под флюсом ленточным электродом;
- 5 – плазменной струёй с токоведущей проволокой

Аналогично может влиять и применение при наплавке, выполняемой под флюсом или в защитных газах, электродной ленты, спрессованной из порошков, по сравнению с прокатной. Большое электрическое сопротивление спрессованной ленты и её меньшая теплопроводность приводят к более быстрому её расплавлению (большему α_n при том же, как при прокатанной ленте, режиме наплавки) и возможному уменьшению доли основного металла в наплавленном слое.

Естественно, что на долю основного металла в наплавленном слое влияет и интенсивность теплоотвода в наплавленном изделии, который зависит от теплофизических свойств металла этого изделия, его геометрических размеров (в частности, толщины металла вблизи наплавляемой поверхности), а также наличия искусственного регулирования термического режима наплавляемой детали (сопутствующего наплавке подогрева или интенсификации охлаждения различными приёмами). При увеличении толщины детали усиливается отвод тепла и уменьшается проплавление основного металла.

Разбавление наплавленного металла основным необходимо ограничивать. Это может быть достигнуто выбором перекрытия валиков при наплавке каждого (особенно первого) слоя (рис. 5.6).

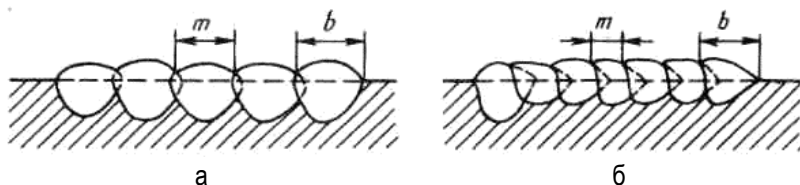


Рис. 5.6. Влияние шага наплавки на долю основного металла в составе наплавленного слоя:

а – шаг m близок к ширине валика b , $\gamma_0 = 0,65$; б – шаг $m = 0,46 b$, $\gamma_0 = 0,45$

Так, при наложении 1-го слоя, согласно рис. 5.6, а, без перекрытия ($m/b \rightarrow 1$), доля основного металла γ_0 составляет $\sim 0,65$, а при перекрытии по ширине $m/b = 0,46$ эта доля уменьшается до $\sim 0,45$. В связи с этим такой метод перекрытия весьма распространён при наплавке.

При ручной наплавке $m/b \approx 0,35$, при автоматической наплавке под флюсом проволокой круглого сплошного сечения $m/b = 0,4-0,5$. Увеличение m/b может привести к неблагоприятной форме выпуклости валика и непровару места перехода от предыдущего валика к последнему. Заметно может быть уменьшено значение m/b при наплавке ленточным электродом или несколькими плавящимися электродами, обеспечивающими в один проход достаточно широкий слой.

5.7. Термообработка после наплавки

5.7.1. Термообработка после износостойкой наплавки

Термообработку после наплавки осуществляют с целью предотвращения образования трещин в наплавленном слое твёрдого металла, снятия в нём остаточных напряжений, обеспечения оптимальной твёрдости и повышения обрабатываемости резанием.

На практике применяют следующие виды последующей термообработки:

- 1) отжиг для снятия напряжений; низкотемпературный отжиг (или высокотемпературный отпуск) для снятия возникающих при наплавке остаточных напряжений и устранения образующихся закалочных структур включает нагрев и выдержку при определённой температуре ниже точки начала протекания структурных превращений;
- 2) отпуск; для достижения равномерного снижения твёрдости и повышения обрабатываемости наплавленного металла резанием необходим нагрев до температуры превращения неравновесной структуры в равновесную структуру (ниже точки A_{c1}) с последующим медленным охлаждением;
- 3) закалку; для повышения твёрдости наплавленного металла осуществляют последующую термообработку в виде быстрого охлаждения от температуры аустенитизации. По способу охлаждения выделяют закалку в воде, горячей среде, солях и на воздухе, а по способу нагрева – закалку газовым пламенем и токами высокой частоты. Газопламенную закалку, осуществляемую с применением прямого нагрева пламенем, используют для поверхностной закалки любых изделий, в том числе изделий, подвергнутых износостойкой наплавке;
- 4) отпуск на дисперсионное твердение; отпуск включает нагрев до заданной температуры ниже точки A_{c1} с последующим замедленным охлаждением. В процессе выдержки при указанной температуре протекают структурные превращения (распад пересыщенного твёрдого раствора с выделением дисперсных избыточных интерметаллидных фаз), что способствует стабилизации неравновесной структуры и приданию ей требуемых свойств.

Для упрочнения углеродистых сталей чаще всего применяют закалку, обеспечивающую повышение твёрдости путём фиксации пересыщенного твёрдого раствора углерода: при быстром охлаждении аустенита углерод не успевает выделиться из твёрдого раствора с образованием цементита. Твёрдость, полученная при закалке, зависящая от содержания углерода, достигает максимального значения при его содержании более 0,6%.

При закалке мартенситно-аустенитной и быстрорежущей стали повышение твёрдости ограничено высоким содержанием остаточного

аустенита, однако во время отпуска при температуре 500–600°С происходит резкое повышение твёрдости этих сталей в связи с распадом остаточного аустенита и образованием карбидов. Это явление, называемое вторичным твердением, используется для получения посредством термообработки высокой твёрдости после наплавки.

5.7.2. Термообработка после коррозионно-стойкой наплавки

Поскольку наплавку коррозионно-стойкой стали обычно выполняют на деталях из низкоуглеродистой или низколегированной стали, термообработку после наплавки осуществляют по режимам, принятым для основного металла (табл. 5.4).

Таблица 5.4

Режимы термообработки для деталей из углеродистой и низколегированной стали после антикоррозионной наплавки

Режим термообработки	Первая технологическая схема	Вторая технологическая схема
Температура выдержки, °С	625±25	700±25
Продолжительность выдержки, ч	Не менее 1хТ/25	Не менее 2хТ/25
Скорость нагрева и охлаждения, °С	≤ 200х25/Т	
Металл, подвергаемый термообработке	Стальной прокат общего конструкционного назначения и другие углеродистые стали	Конструкционная высокопрочная углеродистая сталь, стальные отливки низколегированной хромомолибденовой стали и другие низколегированные стали
Т – максимальная толщина наплавленного слоя на участке нагрева, мм		

Проблемы, возникающие в случаях, когда коррозионно-стойкую сталь подвергают термообработке по режимам, принятым для углеродистой и низколегированной стали:

1. Ферритная коррозионно-стойкая сталь. Нагрев и выдержка ферритной коррозионно-стойкой стали при температуре 700–900°С обеспечивают повышение вязкости. При этом охлаждение от 600°С рекомендуется проводить на воздухе. После отжига, проведённого для снятия напряжений по режиму, принятому для низколегированной стали, наплавленный металл имеет более высокую пластичность и ударную вязкость, чем в состоянии после наплавки.

При температуре выше 900°C происходит снижение ударной вязкости металла из-за сильного укрупнения кристаллического зерна.

- 2) Аустенитная коррозионно-стойкая сталь. Наплавка аустенитной коррозионно-стойкой стали обеспечивает получение слоя металла, имеющего в исходном состоянии достаточную пластичность, ударную вязкость и коррозионную стойкость. Тем не менее, термообработку после наплавки осуществляют и в данном случае с целью снятия остаточных напряжений. При этом возникает проблема охрупчивания и снижения коррозионной стойкости наплавленного металла вследствие образования σ -фазы и карбидов. σ -фаза представляет собой немагнитное интерметаллическое соединение железа с хромом, обладающее чрезвычайно высокой твёрдостью и хрупкостью. Эта фаза образуется обычно в высокохромистой ферритной стали, однако при длительном нагреве аустенитной стали, содержащей несколько процентов феррита, указанная фаза может возникать и в этой стали.

Образование карбидов при термообработке снижает коррозионную стойкость наплавленного металла. Кроме того, термообработка аустенитной стали при некоторых режимах может способствовать развитию межкристаллитной коррозии.

Аустенитную коррозионно-стойкую сталь можно подвергать следующим видам термообработки:

- 1) термообработка на твёрдый раствор (аустенитизация) с обеспечением полного распада карбидов, растворения углерода в твёрдом растворе аустенита и образования чисто аустенитной структуры низкой твёрдости. Для полного протекания указанных процессов температуру обработки (1040–1120°C) следует повышать по мере увеличения содержания углерода в стали. Скорость охлаждения должна быть достаточно высокой, чтобы предотвратить образование карбидов по границам зерна;
- 2) стабилизирующий отпуск с целью образования стабильных карбидов (ниобия, тантала и титана) в продолжение 2–4 ч выдержки при температуре 850–900°C, т.е. выше температуры образования карбида хрома по границам зерна. Для предотвращения межкристаллитной коррозии наплавленного металла стабилизирующий отпуск совмещают с отпуском для снятия напряжений;
- 3) отпуск с целью снятия остаточных напряжений, возникающих при холодной деформации. При охлаждении от температуры отпуска необходимо учитывать возможность деформации изделия. Отпуск по режиму, принятому для углеродистой и низколегированной стали, не обеспечивает полного снятия напряжений в аустенитной коррозионно-стойкой стали, которую поэтому подвергают отпуску при температуре не ниже 900°C.

6. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГИИ НАПЫЛЕНИЯ. ПРАКТИКА НАПЫЛЕНИЯ. СПОСОБЫ НАПЫЛЕНИЯ, ИХ СУЩНОСТЬ. НАПЫЛЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ. ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ ПОКРЫТИЯ С ОСНОВНЫМ МАТЕРИАЛОМ И МЕЖДУ СОБОЙ. ПОРИСТОСТЬ И ПЛОТНОСТЬ ПОКРЫТИЯ. ТЕРМООБРАБОТКА ПОСЛЕ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ

6.1. Общая характеристика технологии напыления

6.1.1. Общие сведения

Напыление представляет собой процесс нанесения покрытия на поверхность детали с помощью высокотемпературной скоростной струи, содержащей частицы порошка или капли расплавленного напыляемого материала, осаждающиеся на основном металле при ударном столкновении с его поверхностью.

Существующую технологию напыления, в зависимости от применяемого источника тепловой энергии, можно разделить на два основных вида: газопламенное напыление, при котором используется теплота, выделяющаяся при сгорании смеси горючего газа с кислородом, и электрическое напыление, основанное на использовании теплоты, выделяющейся при горении электрической дуги.

Самой популярной и старой разновидностью электрического напыления является дуговая металлизация.

Способ электроимпульсного нанесения покрытий дал хорошие результаты при нанесении покрытий на внутренние цилиндрические поверхности деталей машин.

6.1.2. Преимущества технологии напыления

1. Возможность нанесения покрытий на изделия, изготовленные практически из любого материала.
2. Возможность напыления разных материалов с помощью одного и того же оборудования.
3. Отсутствие ограничений по размеру обрабатываемых изделий. Покрытие можно напылить как на большую площадь, так и на ограниченные участки больших изделий.
4. Возможность применения для увеличения размеров детали (восстановление и ремонт изношенных деталей машин).
5. Относительная простота конструкции оборудования для напыления, его малая масса, несложность эксплуатации, возможность быстро и легко перемещаться.
6. Возможность широкого выбора материалов для напыления. Для напыления можно использовать различные металлы, сплавы, со-

- единения металлов с оксидами, пластмассы, различные химические соединения и их смеси.
7. Небольшая деформация под влиянием напыления.
 8. Возможность использования напыления для изготовления деталей машин различной формы. Напыление производят на поверхность формы-оправки, которую после окончания процесса удаляют: остаётся оболочка из напылённого материала.
 9. Простота технологических операций напыления, относительно небольшая трудоёмкость, высокая производительность нанесения покрытия.
 10. Не требуется специальной дорогостоящей обработки (очистки) продуктов, загрязняющих окружающую среду, в отличие от средств очистки и нейтрализации при гальванических видах обработки изделий.

6.1.3. Недостатки технологии напыления

1. Малая эффективность нанесения покрытий на мелкие детали из-за низкого коэффициента использования напыляемого материала (отношение массы покрытия к общей массе израсходованного материала). В таких случаях поверхностную обработку мелких деталей целесообразно осуществлять гальваническим, химическим, физическим и другими способами (например, диффузионным насыщением, электролитическим, из расплавов металлов и пр.).
2. Вредные условия работы операторов во время предварительной обработки поверхности изделий. Для предварительной подготовки поверхности перед напылением используют пескоструйную или дробеструйную обработку с помощью кварцевого песка, корунда, стальной или чугунной дроби. Эта операция сопровождается загрязнением рабочего участка и ухудшает условия работы оператора, обслуживающего установку.
3. Выделение дыма и аэрозолей во время напыления. Процесс напыления сопровождается образованием облака мельчайших частиц напыляемого материала, взаимодействие которых с окружающим воздухом сопровождается образованием различных соединений и дыма. Вредность соединений и дыма для здоровья людей требует мощных вытяжных устройств.

6.2. Практика напыления

Напыление как процесс ударного осаждения нагретых до плавления частиц на поверхности основного металла включает следующие операции: предварительная обработка поверхности основного металла для обеспечения хорошей адгезии частиц напыляемого материала; напыление; последующая обработка покрытия, осуществляемая по необходимости

и включающая термообработку и уплотнительную обработку термическим или иным способом; чистовая отделка поверхности покрытия.

6.2.1. Подготовка к напылению

Адгезия покрытия возникает под действием ряда механизмов, из которых определяющее значение для многих покрытий имеет механическое сцепление напыляемого материала с поверхностью основы. Основа должна быть достаточно шероховатой.

Для удаления с поверхности жиров и масел широко используют промывку растворителями, например, бензолом, пиробензолом, трихлорпропеном, перхлорпропеном, парами трихлорэтилена и т.п.

Для снятия с поверхности изделия оксидной плёнки изделия подвергают дробеструйной или пескоструйной обработке с использованием стальной дробы, кварцевого и глинозёмного песка.

Для придания шероховатости поверхности основы используют следующие основные способы обработки: дробеструйную или пескоструйную обработку; механическую обработку поверхности; нанесение на поверхность изделия подслоя материала, обладающего высокой адгезией к основному металлу (например, молибдена или алюминиды никеля).

Дробеструйную (пескоструйную) обработку осуществляют в двух вариантах: нагнетательную, при которой дробь (песок) наплавляют на обрабатываемую поверхность в струе сжатого воздуха, и инжекционную, путём всасывания дробы (песка) из бункера.

Кроме того, применяют центробежную дробеструйную (пескоструйную) обработку путём подачи дробы (песка) во вращающуюся с большой скоростью крыльчатку, благодаря чему дробь разгоняется и под действием центробежных сил сбрасывается на обрабатываемую поверхность изделия.

В качестве абразивных материалов используют стальную дробь (крошку), дробь отбелённого чугуна, силикатный песок, речной песок, кремний, гранит, плавленный глинозём, карбид кремния и другие виды материалов в форме угловатых частиц.

Нанесение покрытия следует начинать вскоре после окончания предварительной обработки поверхности, поскольку длительная выдержка активированной поверхности с большой эффективной площадью сопровождается активным её окислением, снижающим прочность сцепления покрытия с основным металлом.

Путём напыления молибденом или плакированным порошком системы никель-алюминий на поверхности основного металла получают тонкое покрытие с шероховатой поверхностью, на которую можно напылять другой материал. Такое подготовительное покрытие называют подслоем. Молибденовое покрытие и покрытие плакированным порошком широко используют при напылении на углеродистую и коррозионно-стойкую сталь как способ повышения адгезии последующего упрочняющего или

коррозионно-стойкого покрытия. Покрытия в качестве подслоя имеют обычно толщину порядка 0,05–0,13 мм.

При напылении алюминиевого покрытия толщиной более 0,2 мм или цинкового покрытия толщиной более 0,25 мм на поверхность, предварительно подготовленную дробеструйной обработкой, напыляют подслоем (~0,03 мм) из углеродистой стали, содержащей углерод не более 0,25%. Такой подслоем позволяет значительно повысить прочность сцепления алюминиевого или цинкового покрытия с основой, исключает опасность его отслаивания.

6.2.2. Напыление

В практике напыления следует руководствоваться приведёнными ниже общими рекомендациями:

1. *Состояние поверхности металла изделия.* Если при визуальном осмотре на поверхности изделия обнаружены следы загрязнений (влага, оксиды, окалина и т.п.), то следует вновь осуществить соответствующую очистку поверхности. После пескоструйной обработки первый слой следует напылять не позднее чем через 4 ч, а общая продолжительность от окончания пескоструйной обработки до завершения процесса напыления покрытия не должна превышать 8 ч.
2. *Дистанция напыления.* Оптимальное расстояние от среза сопла горелки до поверхности напыления обычно не выходит за пределы 75–250 мм. При малой дистанции напыления создаётся опасность деформации основного металла под влиянием термических напряжений; когда же расстояние слишком большое, температура и скорость напыляемых частиц снижаются, что приводит к образованию рыхлого покрытия и уменьшению прочности сцепления с основой. В конечном счёте может произойти отслоение покрытия от основы.
3. *Угол напыления.* Наибольшая деформация напыляемых частиц при соударении с поверхностью основы происходит, если горелка установлена перпендикулярно к её поверхности. В случае, когда невозможно обеспечить этот угол, допускается отклонение от вертикали, но не более чем на 45°. При угле напыления менее 90° несколько снижается качество покрытия.
4. *Температура поверхности основного металла в процессе напыления.* Перегрев поверхности основного металла в процессе напыления вызывает снижение прочности сцепления покрытия или становится причиной деформации. Теоретическая температура поверхности основного металла не должна превышать 260°C. При более низкой температуре проводить напыление не рекомендуется, так как напылённое покрытие может отслоиться или растрескаться. В таких случаях рекомендуется предварительный подогрев основного металла до температуры 120–150°C.

5. *Равность толщины покрытия.* Для получения покрытия равномерной толщины желательно, чтобы толщина напыляемого за один проход слоя покрытия не превышала 0,25 мм. Покрытие требуемой толщины следует напылять за несколько проходов.
6. *Толщина напыляемого покрытия.* При нанесении покрытия необходимо учитывать, что на поверхности основы происходит усадка напылённого слоя. При большой толщине покрытия под действием остаточных напряжений, которые появляются в нём в результате усадки напылённого материала, происходит разрушение контактной зоны и в конечном счёте отделение покрытия от основы. При напылении на внутреннюю поверхность труб материалов, имеющих большую усадку, происходит вспучивание покрытия. Одним из путей предотвращения вспучивания покрытия является предварительный подогрев. Минимальная толщина покрытия должна включать припуск на обработку после напыления и некоторый допуск на возможный износ.
7. *Скорость подачи напыляемого материала.* Очень важно, чтобы напыление проходило на оптимально выбранной и поддерживаемой на заданном уровне скорости подачи напыляемого материала. Так, при газопламенном напылении проволокой снижение скорости её подачи вызывает уменьшение размера частиц и их быстрое охлаждение во время движения от горелки до основного металла. Поэтому теплосодержание соударяющихся с поверхностью частиц меньше и сцепление их с поверхностью будет плохое. При этом возрастает также интенсивность окисления частиц в период их движения в струе.

В табл. 6.1 представлены характеристики и области применения основных видов покрытия. В табл. 6.2 представлены характеристики покрытий при газотермическом напылении.

Таблица 6.1

Характеристики и области применения покрытий

Порошки	Характеристика покрытия	Область применения покрытия
Сплавы на основе Fe, Ni, Cr, Al, Ti	Коррозионная стойкость, малая усадка, лёгкая обрабатываемость	Восстановление изношенных и изготовление новых деталей, нанесение подслоев на детали
Металлы: Al, Zn, Cu, Cr, Ni	Высокая стойкость против коррозии в атмосфере, в морской воде и других агрессивных средах на 20–50 лет	Защитные покрытия мостов, башен, эстакад, трубопроводов

Порошки	Характеристика покрытия	Область применения покрытия
Бронзы, баббит, металлы: Cu, Pb, Cd, Sn	Низкий коэффициент трения, стойкость против кавитации и коррозии	Антифрикционные покрытия двигателей, тракторов, станков и др.
Тугоплавкие металлы: W, Mo, Ta, Nb и смеси на их основе	Высокая адгезия, износостойкость, стойкость к коррозии в расплавах меди, цинка и стекла	Подслой, защитные покрытия деталей металлургического оборудования, ракетной техники
Самофлюсующиеся сплавы на основе Cr – В – Ni – Si	Высокая износостойкость, стойкость против воздействия агрессивных сред и повышенной температуры	Защитные покрытия деталей машин
Карбиды W, Cr, Ti в смесях с Co, интерметаллидами, самофлюсующимися сплавами	Высокая твёрдость, плотность, износостойкость (в том числе к воздействию абразива)	Износостойкие покрытия деталей машин, станков, авиадвигателей, ракет
Оксиды: Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , ZrO ₂ , Cr ₂ O ₃ , SiO ₂ , CaO, VO, MgO, Fe ₂ O ₃	Стойкость к расплавленным металлам, кислотам и щелочам, абразивному изнашиванию, высокие электроизоляционные свойства	Износо- и коррозионно-стойкие, электро- и теплоизоляционные покрытия деталей в атомной, энергетической, металлургической отраслях, деталей приборов, ракетной и космической техники

Таблица 6.2

Характеристики покрытий при газотермическом напылении

Группа	Марка порошка	Характеристика покрытия
Сплавы на основе Fe	ПХ17Н2, ПХ18Н15, ПХ23Н18, ПХ18Н9Т, ПГ-С25, ПГ-ФБХ6-2	Стойкость против коррозии. Износостойкость HRC 52–55
	ПР-180Х16	Износостойкость и коррозионная стойкость HRC 55

Группа	Марка порошка	Характеристика покрытия
Сплавы на основе Ni	ПХ20Н80, ПХ40Н60	Жаростойкость, стойкость против коррозии
Сплавы на основе Ni, Ti, Al (металлиды)	ПН70Ю30	Жаростойкость, коррозионная стойкость HRC 40
	ПН85Ю15	Жаростойкость, износостойкость
	ПН55Т45	Износостойкость HRC 55–60
	ПТ88Н12	Износостойкость, коррозионная стойкость
Самофлюсующиеся сплавы – Ni – Cr – В – Si	ПГ-СР2	Высокая износостойкость, HRC 35
	ПГ-СР3	HRC 45
	ПГ-СР4	HRC 55
	СНГН-50	Высокая износостойкость, HRC 50
	СНГН-55	HRC 55
	СНГН-60	HRC 60
Самофлюсующиеся сплавы – Ni – Cr – В – Si	ВСНГН-35, ВСНГН-80, ВСНГН-88	Весьма высокая износостойкость

6.2.3. Последующая обработка

Покрытие, полученное после напыления, по своей структуре в значительной степени пористое. Для одних назначений покрытий пористость является полезным свойством, а для других она нежелательна и требует принятия мер по её ликвидации. Один из способов ликвидации пор – нанесение слоя краски на поверхность покрытия. Находит применение также способ заполнения пор за счёт пропитки покрытия специальными составами, а для покрытий, напылённых самофлюсующимися сплавами, проводят оплавление покрытий после их нанесения. Для улучшения механических свойств и термостойкости покрытий их нередко подвергают последующей термообработке.

Окраску покрытий проводят, в основном, для того, чтобы повысить антикоррозионную стойкость покрытий, наносимых на чёрные металлы. Проникание красителя внутрь пор способствует упрочнению напылённого покрытия при одновременном повышении стойкости самого красителя.

При окраске с целью блокировки пустот и трещин внутри покрытия высокого эффекта достигают при использовании растворов красителей с низкой вязкостью. Такие растворы при их нанесении на поверхность покрытия легко проникают вглубь за счёт капиллярного эффекта. Поэтому предпочтение следует отдавать красителям, которые при низкой вязкости отличаются высоким содержанием твёрдых фракций. Быстро высыхаю-

щие краски использовать не рекомендуется, поскольку они не способны к глубокому прониканию внутрь покрытий.

Для обработки напылённых покрытий, осуществляемой с целью повышения жаростойкости путём пропитки пор, используют кремнийорганические соединения. В случае их использования при низких температурах применяют воск и жидкие фенольные смолы, а при аналогичной обработке покрытий, предназначенных для работы при температуре 100–290°C, – эпоксидные и фенольные смолы. Покрытия, пропитанные силиконовыми смолами, выдерживают ускоренные коррозионные испытания в атмосфере, заполненной парами солёной воды, при температуре 480°C.

Покрытия из самофлюсующихся сплавов с целью ликвидации пор, повышения адгезии к основному металлу и прочности сцепления между частицами покрытия, подвергают уплотнительной термообработке оплавлением различными способами.

6.2.4. Чистовая обработка покрытий

В состоянии после напыления размер изделий со слоем покрытия не имеет достаточной точности, а сама поверхность получается неровной и относительно шероховатой. Поэтому при напылении дают обычно припуск на последующую механическую обработку, которую осуществляют резанием или мокрым шлифованием.

При необходимости пропитки пор её желательно проводить до чистой механической обработки покрытия, чтобы исключить попадание в поры загрязнений: охлаждающей жидкости, мелкой стружки и т.п.

Для обработки покрытий из углеродистой и коррозионно-стойкой стали можно использовать быстрорежущий твёрдосплавный инструмент.

Покрытия из самофлюсующихся сплавов подвергаются обработке резанием с помощью твёрдосплавных инструментов, хотя в большинстве случаев практикуют мокрое шлифование.

Керамические покрытия подвергают черновой и прецизионной обработке. Для черновой обработки используют шлифовальные круги умеренной твёрдости из карбида кремния с резиновой связкой. Прецизионное шлифование осуществляют алмазными кругами.

6.3. Способы напыления, их сущность

По типу источника тепловой энергии, которая используется для расплавления напыляемого материала, напыление подразделяют на газопламенное и электрическое. При газопламенном напылении нагрев материала осуществляется теплотой сгорания смеси горючего газа с кислородом, а при электрическом – теплотой электрической дуги.

6.3.1. Газопламенное напыление

Газопламенное напыление в зависимости от состояния напыляемого материала может быть трёх типов: напыление проволокой, прутком и порошком.

Принцип газопламенного напыления проволокой (рис. 6.1) аналогичен напылению прутком. Напыляемый материал, имеющий форму проволоки или прутка, подают через центральное отверстие горелки и расплюют пламенем горючей смеси. Расплавленные частицы металла подхватываются струёй сжатого воздуха и в мелко распылённом виде направляются на поверхность изделия.

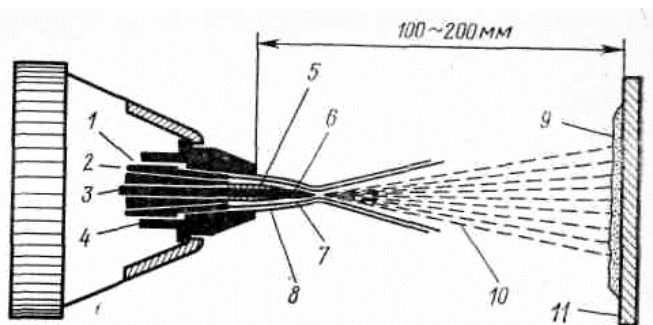


Рис. 6.1. Газопламенное напыление проволокой:

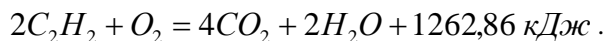
- 1 – сжатый воздух; 2 – ацетиленокислородная пропанокислородная горючая смесь;
- 3 – проволока; 4 – насадок; 5 – ядро ацетиленокислородного пламени;
- 6 – оплавливающий конец проволоки; 7 – факел пламени; 8 – воздушный поток;
- 9 – покрытие; 10 – поток частиц напыляемого материала; 11 – основной материал

Для напыления обычно используют проволоку диаметром не более 3 мм, однако, при напылении легкоплавкими металлами (алюминий, цинк и т.п.) в интересах повышения производительности процесса допускается использование проволоки диаметром 5–7 мм.

При напылении порошком последний поступает в горелку сверху из бункера через отверстие, разгоняется потоком транспортирующего газа (смесь кислорода с горючим газом) и на выходе из сопла попадает в пламя, где происходит его нагрев. Частицы порошка увлекаются струёй горячего газа и попадают на напыляемую поверхность. В порошковых горелках, как и в проволочных, подача напыляемого материала в пламя и разгон образующихся расплавленных частиц могут осуществляться струёй сжатого воздуха.

В качестве горючего газа в большинстве случаев используют ацетилен, можно также применять пропан и водород.

При полном сгорании ацетилена в среде кислорода протекает реакция



Это значит, что для полного сгорания на одну часть по массе ацетилена необходимо 2,5 части по массе кислорода, однако на практике для напыления используют смесь при соотношении в смеси кислорода и ацетилена, равном 1,1. При сгорании смеси такого состава образуется нейтральное пламя, поскольку во время горения в него поступает дополнительный кислород из окружающего воздуха. На начальном участке факела, который образуется непосредственно у выхода из сопла, газообразные продукты имеют восстановительный характер, а в середине пламени, в связи с проникновением туда кислорода окружающего воздуха, происходит полное сгорание ацетилена. При движении напыляемых частиц в факеле они непрерывно нагреваются. Вместе с тем, при напылении проволокой с использованием струи сжатого воздуха из-за поступления большого количества в пламя оно в большей своей части имеет окислительные свойства.

При газопламенном способе напыление осуществляется в основном, теми материалами, температура плавления которых ниже температуры пламени.

При газопламенном напылении порошком на расстоянии 60–70 мм от сопла температура пламени превышает 2500°C; по мере дальнейшего увеличения расстояния она постепенно снижается: на расстоянии 100 мм температура составляет 1900°C, на расстоянии 150 мм – 1400°C. При напылении проволокой быстрое снижение температуры пламени начинается от самого среза сопла горелки и нарастает по мере увеличения расстояния: на расстоянии 50 мм температура пламени составляет 1500°C, на расстоянии 100 мм и 150 мм – 500 и 200°C соответственно. Это связано с охлаждающим действием на пламя струи воздуха.

В табл. 6.3 представлена температура пламени различных горючих смесей.

Таблица 6.3

Температура пламени для горючих смесей разного состава

Состав смеси	Температура, °С
Кислород – ацетилен	3100
Кислород – бутан	3100
Кислород – пропан	2760
Кислород – водород	2700
Кислород – светильный газ	2000
Воздух – ацетилен	2325
Воздух – водород	2055
Воздух – светильный газ	1530

После напыления иногда проводят оплавление покрытия, которому, в частности, подвергают покрытия, напылённые самофлюсующимися сплавами на никелевой и кобальтовой основе с добавлением в них бора и кремния. Оплавление обеспечивает получение плотного покрытия, практически без пористости.

6.3.2. Детонационное напыление

На рис. 6.2 показано детонационное напыление.

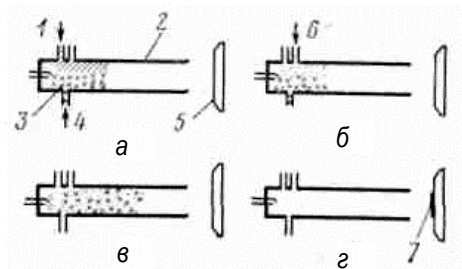


Рис. 6.2. Схема детонационного напыления:

- 1 – сопло для подачи кислорода; 2 – водоохлаждаемый ствол; 3 – камера сгорания;
- 4 – сопло для подачи ацетилена; 5 – основной материал (подложка);
- 6 – сопло для подачи в камеру сгорания карбида вольфрама с азотом;
- 7 – покрытие

В камеру водоохлаждаемого ствола установки диаметром 25,4 мм подаются кислород и ацетилен в строго определённых количествах. Ствол направляется на обрабатываемую деталь (см. рис. 6.2, а). Затем через специальное отверстие в камеру азотом подаётся порошок напыляемого материала, например, карбида вольфрама с добавлением небольшого количества металла, оксида алюминия и т.п. (см. рис. 6.2, б). Газовую смесь, в которой во взвешенном состоянии находится напыляемый порошок, поджигают электрической искрой (см. рис. 6.2, в). В результате взрыва смеси происходит выделение теплоты и образуется ударная волна, которая разогревает и разгоняет частицы порошка в направлении к поверхности изделия (см. рис. 6.2, г).

Азот и горючий газ выходят из ствола установки сразу же после взрыва, затем ствол продувается азотом для удаления продуктов горения. Процесс отрегулирован таким образом, что точно повторяется с частотой 3–4 цикла в секунду. За один цикл напыления получают покрытие толщиной ~6 мкм. Напыление осуществляют до получения покрытия заданной толщины (0,25–0,3 мм).

Во время взрыва порошковый материал приобретает большую кинетическую энергию, так что скорость частиц на расстоянии 75 мм от среза ствола установки составляет ~820 м/с. При размещении поверхности

материала на указанном расстоянии порошок в момент столкновения с поверхностью разогревается до температуры 4000°С. Высокая скорость движения частиц и их разогрев при детонационном напылении обеспечивают получение покрытия высокой плотности и прочности сцепления с основой. При этом температура основного материала остаётся низкой, исключая его деформацию или иное физическое изменение, что позволяет использовать этот способ напыления для прецизионных деталей.

Вместе с тем детонационному напылению свойственны недостатки, связанные, в частности, с возможностью нанесения покрытия только на материалы, в которых не возникает остаточная деформация при действии взрывной волны. Из-за большого шума (до 140 дБ) оборудование для детонационного напыления устанавливают в камере с двойными стенками, а наблюдение за процессом осуществляют через смотровое окно.

6.3.3. Дуговая металлизация

Принципиальная схема дуговой металлизации показана на рис. 6.3.

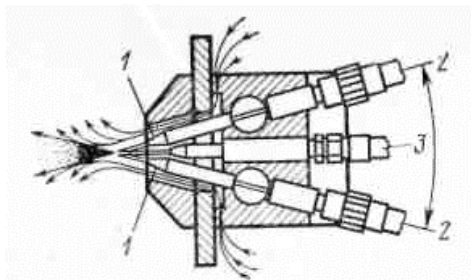


Рис. 6.3. Схема дугового напыления:

- 1 – насадка; 2 – место ввода напыляемого материала (проволоки);
3 – место подачи сжатого воздуха

Через два канала в горелке непрерывно подают две проволоки (диаметром 1,5–3,2 мм), между концами которых возбуждается дуга и происходит расплавление проволоки. Расплавленный металл подхватывается струей сжатого воздуха, истекающего из центрального сопла электрометаллизатора, и в мелкорасплавленном виде переносится на поверхность основного материала. Распыление и транспортирование расплавленного металла осуществляют обычно сжатым воздухом, хотя при напылении коррозионно-стойкой сталью и алюминиевым сплавом используют азот. При дуговом напылении на постоянном токе процесс протекает стабильно, обеспечивая получение слоя покрытия с мелкозернистой структурой при высокой производительности процесса.

На рис. 6.4 приведена схема расплавления электродной проволоки при напылении и процесса переноса частиц расплавленного металла воздушной струей.



Рис. 6.4. Процесс расплавления напыляемого материала в электрометаллизаторе: 1 – анод; 2 – катод

Температура дуги зависит от вида транспортирующего газа, состава электродной проволоки, режимов напыления и других параметров. При использовании металлических электродов и силе тока дуги 280 А достигается температура $\sim 6000^{\circ}\text{C}$. Такая высокая температура облегчает образование жидких капель напыляемого материала.

По сравнению с газопламенным напылением электрометаллизация позволяет получать более прочное покрытие, которое лучше соединяется с основой. При использовании в качестве электродов проволок из двух различных материалов можно получить покрытие из их сплава. Такого рода сплавы называют псевдосплавами.

К числу недостатков дугового напыления относится опасность перегрева и окисления напыляемого материала при малых скоростях подачи распыляемой проволоки. Кроме того, большое количество теплоты, выделяющейся при горении дуги, приводит к значительному выгоранию легирующих элементов, входящих в напыляемый сплав (например, содержание углерода в металле покрытия снижается на 40–60%, а кремния и марганца – на 10–15%).

6.3.4. Плазменное напыление

Механизм образования плазмы состоит в следующем: при температуре около абсолютного нуля молекулы газа, состоящие из двух атомов (водород, азот и т.п.), имеющие вид гантели, совершают только параллельное перемещение по трём осям (x , y и z), при температуре 10К возникают также вращательные движения. При дальнейшем повышении температуры, например до 1000К, возникают колебания атомов. Интенсивные столкновения молекул вызывают их диссоциацию (распад на атомы). Температура перехода в атомарное состояние зависит, в основном, от рода газа и его парциального давления. Для кислорода она составляет 3000К, для азота $\sim 4500\text{K}$.

При повышении температуры развивается процесс ионизации газов, выражающийся в потере атомами электронов. Достаточно полная ионизация кислорода при атмосферном давлении наступает при 10000К.

Газ, в котором значительная часть атомов или молекул ионизирована, а концентрация электронов и отрицательных ионов равна концентрации

положительных ионов, называется плазмой. Плазма, которая в целом является квазинейтральной, не имеет электрического заряда. Отличительная черта плазмы – высокая электропроводимость. Обычная электрическая дуга также находится в плазменном состоянии.

Принцип плазменного напыления показан на рис. 6.5.

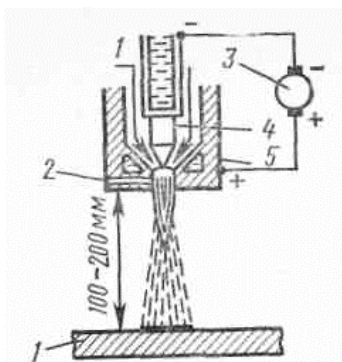


Рис. 6.5. Схема плазменного напыления:

1 – плазмообразующий газ; 2 – место ввода напыляемого материала;
3 – источник питания; 4 – катод; 5 – анод

Между катодом (из чистого вольфрама или с добавлением 2% тория) и медным водоохлаждаемым соплом, служащим анодом, возникает дуга, нагревающая поступающий в сопло горелки рабочий газ, который истекает из сопла в виде плазменной струи. В качестве рабочего газа используют аргон или азот, к которым иногда добавляют водород. Порошковый наплавочный материал подаётся в сопло струёй транспортирующего газа, нагревается плазмой и с ускорением переносится на поверхность основного материала для образования покрытия.

КПД плазменной горелки составляет в среднем 60%, поэтому 50–70% общего потребления электрической энергии затрачивается на нагрев рабочего газа до средней температуры на выходе из сопла. Аргон имеет гораздо более высокую температуру, чем азот и водород. Высокая скорость истечения плазменной струи связана с резким расширением газа при повышении температуры. Аргон обеспечивает более высокую скорость плазменной струи, чем азот и водород.

Плазменное напыление обладает рядом важных преимуществ:

- высокая температура плазмы позволяет проводить напыление тугоплавких материалов;
- возможность регулирования температуры и скорости плазменной струи путём выбора формы и диаметра сопла и режима напыления расширяет диапазон напыляемых материалов (металлы, керамика, органические материалы);

- использование инертного газа в качестве рабочего газа открывает возможность напыления в камерах с атмосферой инертного газа;
- покрытия, полученные методом плазменного напыления, обладают высокой плотностью и хорошим сцеплением с основой.

Недостатки плазменного напыления:

- сравнительно низкая производительность процесса напыления;
- шум при работе;
- интенсивное ультрафиолетовое излучение;
- высокая стоимость оборудования и большие эксплуатационные затраты.

6.3.5. Электроимпульсное нанесение покрытий

Электроимпульсное нанесение покрытий основано на импульсном разряде конденсатора через проволоку напыляемого металла. При этом происходит взрывное плавление проволоки и осаждение расплавленных мелких частиц металла на поверхности изделия. На рис. 6.6. показана принципиальная схема электроимпульсного нанесения покрытий.

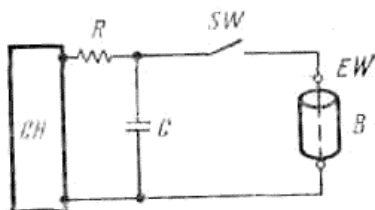


Рис. 6.6. Схема электроимпульсного напыления:

CH – источник питания для зарядки конденсатора; *R* – резистор; *C* – конденсатор; *SW* – выключатель; *EW* – проволока; *B* – основной материал (цилиндрическое изделие)

Используемая для нанесения покрытий электроразрядная цепь представляет собой колебательный контур и характеризуется следующими данными: ёмкость конденсатора 100 мкФ, максимальное напряжение зарядного тока 30 кВ, собственная частота колебаний электроразрядной цепи 25 кГц. Для напыления используют металлическую, например вольфрамовую, проволоку диаметром 0,5–1,0 мм и длиной 20–150 мм.

При разряде в оптимальном режиме около 40% массы проволоки превращается в газ, а остальные 60% – в капли расплавленного металла, сталкивающиеся с поверхностью основного материала. Образующиеся при взрывном разряде капли напыляемого металла можно разделить на две группы, к одной из которых относятся частицы размером несколько микрометров, а к другой – размером несколько сотых долей микрометра. Покрытие образуется за счёт осаждения на поверхности частиц первой группы, тогда как частицы второй группы улетаются, превращаясь

в аэрозоль. При недостаточном уровне энергии разряда металлическая проволока расплавляется без взрыва, а при чрезмерном уровне энергии – полностью переходит в газообразное состояние. И в том, и в другом случае напыление невозможно.

Своеобразие электроимпульсного нанесения покрытий связано с особым малым размером частиц напыляемого материала в мелкораспыленном состоянии. При столкновении с поверхностью основного материала скорость движения частиц достигает нескольких сотен метров в секунду. Движение частиц к основному материалу происходит за счёт резкого расширения газа при взрыве и вытеснении воздуха из зоны взрыва, что почти полностью исключает окисление частиц, следовательно, обеспечивает получение плотного покрытия с высокой прочностью сцепления с основным материалом. Недостаток электроимпульсного напыления состоит в том, что его применение ограничено электропроводными материалами.

6.3.6. Нанесение металлических покрытий методом плакирования гибким инструментом

В 1937 г. А.А. Абиндером был предложен новый способ нанесения металлических покрытий с использованием металлических щеток (плакирование гибким инструментом). Но, несмотря на столь давнюю известность, этот способ подробно стали исследовать только в 1986 г. в Магнитогорском горно-металлургическом институте (ныне Магнитогорский государственный технический университет). Плакирование гибким инструментом (ПГИ) совмещает в себе нанесение металлических покрытий и одновременное пластическое деформирование поверхности, в результате чего формируется поверхностный слой, характерный только для данного способа. Этому методу присущи простота, низкая энергоёмкость и экологическая чистота, поэтому в настоящее время он широко распространён в технологических процессах металлообработки.

Для практической реализации метода ПГИ в основном используются схемы, приведенные на рис. 6.7.

Во всех трёх схемах процесс плакирования осуществляется при взаимодействии трёх элементов: элемента из материала покрытия 1, быстро вращающейся щетки 2 и движущейся детали 3. За счёт интенсивного тепловыделения в контакте щетки 2 и элемента 1, поверхность последнего разогревается до высоких температур, частички материала покрытия налипают на периферийную часть ворса и переносятся к детали 3.

Температурные и силовые условия в зоне взаимодействия щётки и детали подбирают так, чтобы возникли интенсивное схватывание и перенос металла покрытия с ворса щетки на обрабатываемую поверхность. В результате формируется сплошное, прочно сцепленное с основой покрытие.

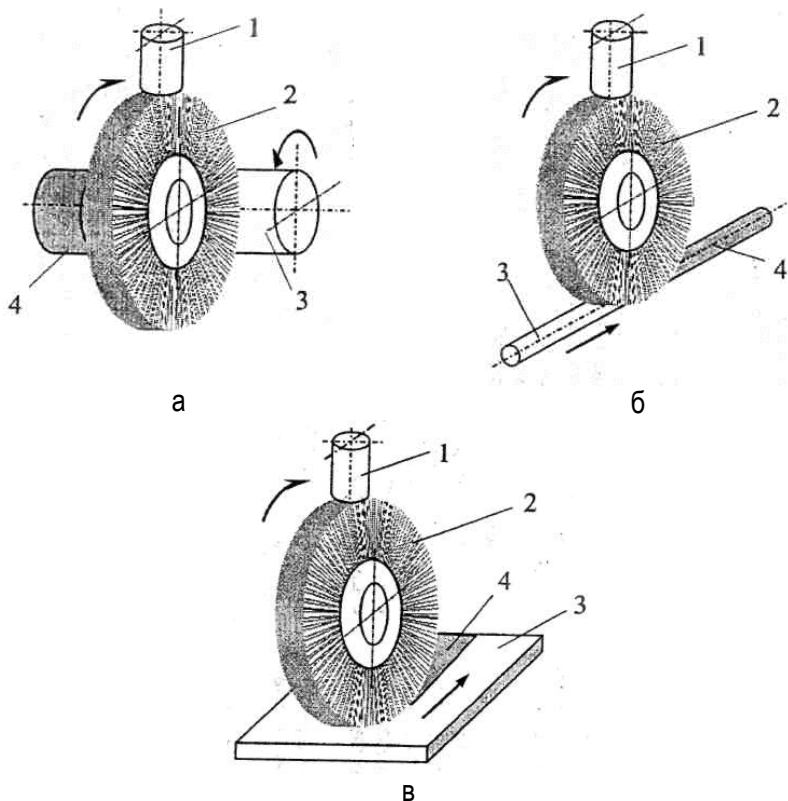


Рис. 6.7. Основные схемы реализации ПГИ:

- 1 – элемент из материала покрытия (ЭМП); 2 – дисковая проволочная щётка;
 3 – обрабатываемая деталь; 4 – нанесённое покрытие

Различие между схемами состоит в расположении детали, направлении и характере ее движения относительно щётки.

В схеме на рис. 6.7, а продольные оси щётки и детали параллельны, деталь вращается и одновременно движется в осевом направлении. Такой характер взаимодействия применяется при плакировании цилиндрических тел большого диаметра и сравнительно малой длины.

При реализации схемы по рис. 6.7, б продольные оси щётки и детали перекрещиваются в пространстве. Их проекции либо перпендикулярны, либо пересекаются под углом 25° – 45° . Данный порядок взаимодействия применяется при обработке длинномерных изделий незначительного диаметра или ширины (проволока, лента).

Схема, изображенная на рис. 6.7, в, применяется при обработке широких плоских деталей. Обрабатываемая поверхность поступательно движется относительно щётки в двух направлениях.

Общим для всех рассмотренных схем (см. рис. 6.7) и их разновидностей является то, что щётка находится в постоянном контакте с деталью от начала и до конца обработки. Основным недостатком представленных схем реализации ПГИ является то, что они не обеспечивают формирования покрытий значительной толщины.

В настоящее время известны различные виды гибких инструментов: дисковые, кольцевые, валковые, торцевые, плоские, концевые, секционные, пучковые и ленточные щётки, а также иглофрезы. Но не все виды подобных инструментов могут быть применены для ПГИ, так как при плакировании необходимо обеспечить определённое тепловое и напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя. Наиболее часто для нанесения покрытий используют простые и универсальные дисковые щётки с проволочным ворсом. Диаметр щёток, в основном, варьируется от 200 до 350 мм, они работают при частоте вращения от 1500 до 10000 об/мин, а скорость скольжения ворса по детали при этих условиях составляет 25–40 м/с. Щётки изготовляют из канатной проволоки диаметром 0,2–0,6 мм. Покрытия из мягких металлов и сплавов на стальные поверхности рекомендуется наносить мягкими щётками из проволоки 0,2–0,35 мм с коэффициентом заполнения ворсинками рабочей поверхности инструмента 0,3.

Для расширения технологических возможностей и повышения качества обработки в конструкцию дисковых щёток вносят различные изменения и дополнения. Например, для дополнительной пластической деформации ворс щётки могут комбинировать с ударными элементами в виде роликов, которые дополнительно уплотняют покрытие и упрочняют поверхностный слой.

В качестве материала покрытия может использоваться сам ворс щётки.

Для реализации ПГИ чаще всего используются шлифовальные и токарно-винторезные станки. Шлифовальные станки не требуют большой модернизации, на них, вместо абразивного круга, достаточно установить металлическую щётку и смонтировать на защитном кожухе механизм подачи элемента из материала покрытия (ЭМП). При использовании токарно-винторезных станков вместо резцедержателя устанавливаются приставка, содержащая вращающуюся металлическую щётку с приводом, механизм подачи материала покрытия и органы управления.

При плакировании больших партий изделий выгодно изготавливать специальные устройства, позволяющие увеличить производительность, например, при обработке проволоки или ленты.

6.3.7. Нанесение металлических покрытий методом дробного плакирования гибким инструментом

Основным недостатком традиционного способа плакирования гибким инструментом является малая толщина наносимых покрытий, что не позволяет использовать его, например, для восстановления изношенных

деталей и производства биметаллических изделий с большой толщиной внешнего слоя.

Для формирования покрытия толщиной до 1000 мкм и более применяется усовершенствованный способ – дробное плакирование гибким инструментом (дробное ПГИ). Его отличие заключается в циклическом воздействии щётки на деталь, т. е. после каждого их кратковременного контакта следует пауза. Принципиальные схемы реализации этого метода представлены на рис. 6.8.

При обработке внешних цилиндрических поверхностей могут быть реализованы следующие схемы дробного ПГИ:

– вращающейся щётке сообщают прямолинейное возвратно-поступательное движение по траектории касательной к детали, а деталь поворачивают вокруг её оси (рис. 6.8, а);

– вращающемуся изделию придают дополнительное прямолинейное возвратно-поступательное движение по траектории касательной к щётке (рис. 6.8, б);

– вращающимся деталям придают дополнительное круговое движение вокруг внешнего центра так, чтобы они периодически касались щётки (рис. 6.8, в).

Схему, изображённую на рис. 6.8, а, целесообразно использовать при обработке крупногабаритных и тяжёлых деталей, которым технически трудно придать дополнительное возвратно-поступательное движение из-за возникающих больших инерционных сил. Другие схемы следует использовать при обработке мелких цилиндрических деталей.

Плоские поверхности можно обрабатывать по схемам, изображённым на рис. 6.8, г и д. В первом случае дополнительное возвратно-поступательное движение сообщается вращающейся щётке, а во втором – поступательно движущемуся изделию.

Схема обработки внутренних цилиндрических поверхностей представлена на рис. 6.8, е. Щётка вместе с бруском из материала покрытия находится внутри вращающегося изделия и при возвратно-поступательных колебаниях периодически прижимается к обрабатываемой поверхности в диаметрально противоположных точках.

Во всех рассмотренных схемах изделию или щётке придается дополнительное возвратно-поступательное движение или вращение вокруг внешнего центра. Поэтому для характеристики режима дробного ПГИ, наряду с параметрами, применяемыми в известном способе (натяг, длина и диаметр ворса щётки, скорость и направление движения детали, скорость щётки, число проходов, усилие прижатия элемента материала покрытия к инструменту и т.д.), необходимо использовать и параметры дополнительного движения: частота ν , амплитуда L_a , скорость $V_{\text{доп}}$. Поскольку эти параметры связаны между собой, для описания режима можно использовать любые два.

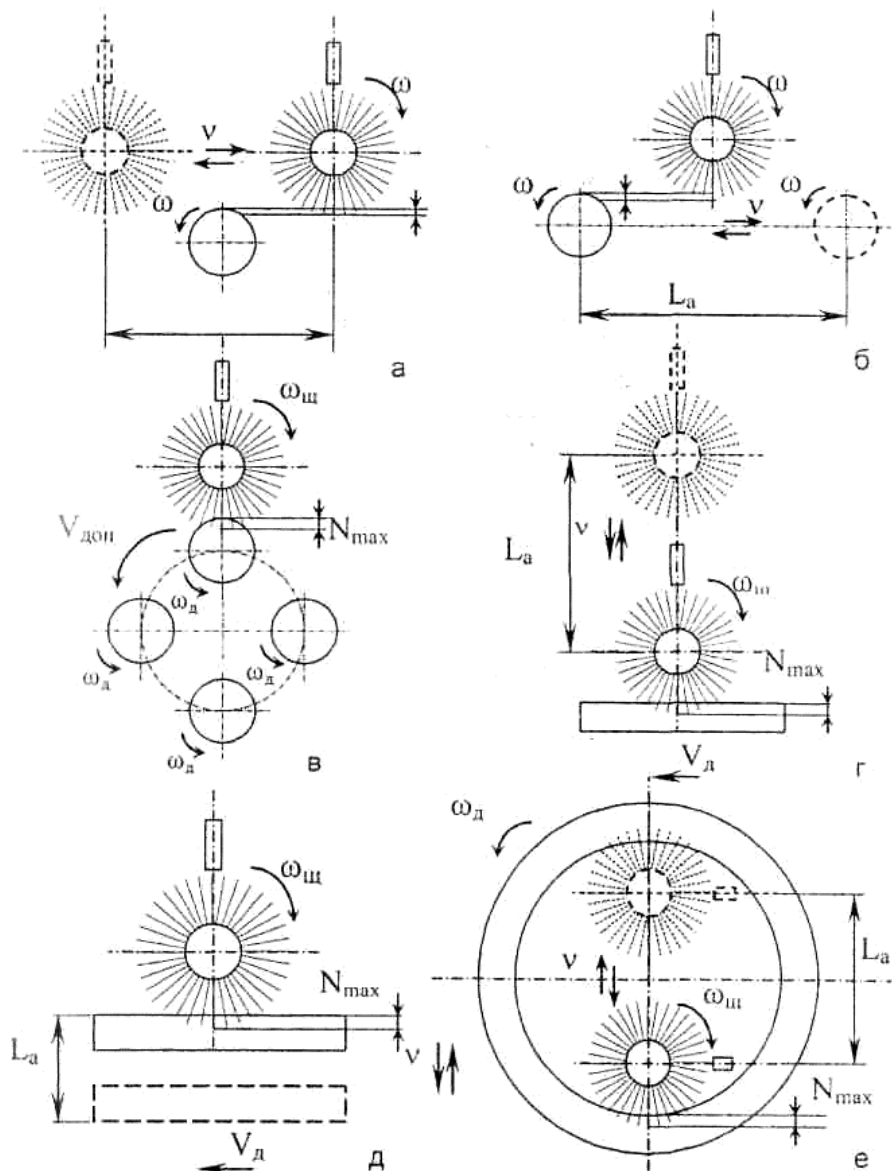


Рис. 6.8. Принципиальные схемы реализации метода дробного ПГИ:

L_a, v – амплитуда и частота возвратно-поступательного движения;

$V_{дон}$ – линейная скорость дополнительного движения детали;

N_{max} – максимальный натяг, V_d – линейная скорость детали;

$\omega_{щ}, \omega_d$ – угловая скорость щётки и детали

Формирование покрытия большей толщины при дробном ПГИ возможно по следующим причинам.

Во-первых, зона взаимодействия будет иметь переменную длину. При входе детали в контакт со щёткой она начнёт увеличиваться от нуля до некоторого максимального значения, соответствующего N_{\max} . Затем длина этой зоны станет уменьшаться. Ударный участок, где наносится покрытие, будет иметь постоянные размеры в течение всего цикла взаимодействия щётки и детали, а участок скольжения, где покрытие срезается, изменять свою длину. Только в середине каждого цикла он примет максимальные размеры, соответствующие размерам участка скольжения при ранее известном способе. В течение основного времени взаимодействия протяжённость участка скольжения будет меньше, что обеспечит резкое снижение срезания и распыления нанесённого материала и позволит непрерывно наращивать толщину покрытия.

Во-вторых, благодаря прерывистому контакту щётки и детали, на поверхности детали может поддерживаться необходимый регулируемый интервал температур, обеспечивающий хорошее схватывание наносимого покрытия. Кроме того, в паузах между взаимодействиями поверхностный слой покрытия несколько остужается, в то время как температура переносимых частиц на концах ворсинок остается на прежнем уровне. Благодаря этому может поддерживаться направленный перенос материала покрытия на обрабатываемую поверхность.

В-третьих, время пауз между касаниями может быть незначительным и поэтому на поверхности изделия не успевают образоваться оксидная плёнка, способная препятствовать нанесению покрытия.

В-четвертых, в паузах между взаимодействиями на концах ворсинок накапливается большее количество материала покрытия, чем при обычном плакировании, что приводит к формированию более густых «мазков» в ударной зоне.

Перечисленные особенности дробного ПГИ в совокупности позволяют практически полностью устранить срез и распыление покрытия в процессе плакирования и делают возможным нанесение слоёв неограниченной толщины. Это обеспечивает его применение для восстановления изношенных деталей не только прецизионных пар трения, но и деталей, имеющих износ до 1 мм. Кроме того, дробное ПГИ сохраняет все положительные качества непрерывного ПГИ, а некоторое увеличение времени обработки компенсируется повышением ширины обрабатывающего инструмента.

6.4. Напыляемые материалы

В качестве напыляемого материала можно использовать практически все материалы, существующие в твёрдом виде, которые в процессе напыления не испаряются и не изменяют значительно своих свойств. Напыля-

емые материалы применяют в виде проволоки, прутков и порошка. Проволоку и прутки используют при газовом, дуговом и электроимпульсном напылении, а порошки – при плазменном, детонационном и газопламенном напылении.

6.4.1. Напыляемые материалы в виде проволоки

Алюминий. Алюминиевое покрытие используют для защиты чёрных металлов от коррозии, а в случае последующего диффузионного отжига покрытия происходит диффузия алюминия в основной металл, что позволяет получать слой, обладающий стойкостью к высокотемпературному окислению. Проволоку с алюминиевым покрытием используют в качестве электрических проводов.

Для напыления используют алюминиевую проволоку, содержащую не менее 99,85% Al.

Цинк. Цинковое покрытие используют для защиты чёрных металлов от коррозии.

Проволоку для напыления изготавливают из наиболее чистого цинка – не менее 99,995% Zn. Чем чище цинковая проволока, тем мельче она расплывается и тем плотнее и качественнее получаемое покрытие.

Молибден. В связи с хорошей адгезией молибдена к чёрным металлам его часто используют для нанесения подслоя, на который затем напыляют слой требуемого материала.

Само молибденовое покрытие используют как средство повышения жаростойкости. Молибден является единственным промышленным металлом, обладающим стойкостью к горячей концентрированной соляной кислоте.

Для напыления используют материал с содержанием не менее 99,95% Mo.

Олово и его сплавы. Лужение как способ повышения кислотостойкости и коррозионной стойкости широко используют в производстве пищевой тары. Для этой цели используют олово самой высокой чистоты, уделяя особое внимание содержанию мышьяка.

Баббитовое покрытие, состоящее из олова и свинца, используют во вкладышах подшипников.

Медь и её сплавы. Для напыления используют проволоку из следующих материалов на основе меди:

- 1) чистая медь (не менее 99,0% Cu) используется для нанесения электропроводных и декоративных покрытий;
- 2) алюминиевая бронза (5–12% Al) с добавлением небольшого количества железа, никеля и марганца обладает высокой коррозионной стойкостью, особенно в морской воде, а также стойкостью к действию серной и соляной кислот, однако, она не обладает стойкостью к азотной кислоте. Кроме того, бронза хорошо противостоит

коррозионной усталости, является эрозионно-стойкой и износостойкой;

- 3) фосфористая бронза с содержанием 0,03–0,35% Р, применяемая в качестве раскислителя, обеспечивает покрытие, обладающее высокой износостойкостью; её используют для упрочнения новых и восстановления изношенных частей валов и подшипников скольжения судовых механизмов. Красивый светло-коричневый цвет покрытия фосфористой бронзы может быть использован для декоративной отделки;
- 4) латуни, обладая хорошей коррозионной стойкостью, корродируют в морской воде при повышенных температурах. Для напыления используют судостроительную латунь, стойкую к морской воде;
- 5) свинцовистая бронза представляет собой медный сплав, содержащий 23–42% Рb. Покрытие антифрикционной свинцовистой бронзы, обладающее стойкостью к схватыванию при высоких удельных нагрузках, широко используют в подшипниках, работающих в режиме высоких скоростей и удельных нагрузок.

Никель и его сплавы. При проволочном напылении используют следующие материалы этой группы:

- 1) чистый никель применяют для защиты от эрозионного воздействия. Никель растворяется в азотной кислоте и царской водке, но довольно медленно растворяется в соляной и серной кислотах, не корродирует в воде и устойчив в большинстве химических соединений;
- 2) нихром (сплав 80% Ni и 20% Cr) практически не окисляется при высокой температуре и хорошо противостоит действию некоторых кислот и щелочей, что предполагает нанесение нихромового слоя на изделие с целью повышения его жаростойкости и коррозионной стойкости. Вместе с тем, покрытие из нихрома нестойко при высокой температуре в среде, содержащей сероводород и сернистый газ. Также оно нестойко в азотной и соляной кислотах;
- 3) монель обладает высокой коррозионной стойкостью и кислотоустойкостью, хорошо противостоит действию солёной воды, в нейтральных и щелочных растворах практически не корродирует. По отношению к слабым кислотам обладает сравнительно хорошими антикоррозионными свойствами.

Углеродистая и низколегированная сталь. Эти стали наиболее широко используют для повышения износостойкости деталей машин. Их широко применяют также для реставрации изношенных деталей.

Коррозионно-стойкая сталь. Предназначенную для напыления сталь, обладающую высокой коррозионной стойкостью и жаростойкостью, можно разделить на две группы:

- 1) Мартенситная коррозионно-стойкая сталь. Быстрое охлаждение металла Fe – Cr, находящегося в области аустенитного или аусте-

нитно-ферритного состояния, обеспечивает получение структуры мартенсита. Высокоуглеродистые стали при этом приобретают высокие износостойкость и коррозионную стойкость.

- 2) Аустенитная коррозионно-стойкая сталь. Сплавы системы Fe – Cr – Ni и Fe – Cr – Ni – Mn при нормальной температуре имеют структуру аустенита. Аустенитные стали обладают высокой коррозионной стойкостью и жаростойкостью.

Серебро. Этот металл используют для напыления электрических контактов и нанесения покрытий на оси перед напрессовкой деталей (толщина покрытия ~0,1 мм).

6.4.2. Прутковые напыляемые материалы

Прутковые напыляемые материалы изготавливают из порошков оксидов металлов методом порошковой металлургии. В порошок добавляют связующее вещество, смешивают, прессуют и спекают.

Для газопламенного напыления применяют оксид алюминия (глинозём), силикат циркония, диоксид циркония, оксид хрома, магнезиальную шпинель.

6.4.3. Порошковые напыляемые материалы

Практически любой напыляемый материал можно изготовить в виде порошка. Плазменное, детонационное, газопламенное напыление некоторыми материалами может быть осуществлено только путём использования порошковых материалов.

Применение мелкодисперсного порошка обычно способствует повышению плотности напыляемого покрытия. Недостаток такого покрытия заключается в том, что в нём содержится большое количество оксидов, образовавшихся в результате перегрева частиц при движении в высокотемпературном потоке газа.

При напылении порошка, состоящего из смеси частиц разного размера, однородность покрытия нарушается из-за большого различия между крупными и мелкими частицами по степени расплавления и скорости их движения в напылительной струе. Для напыления обычно используют порошки, подобранные по грануляции таким образом, чтобы размеры их не выходили за пределы 44–74 мкм. В последнее время при напылении мощными плазменными горелками используют мелкие порошки с размером частиц в несколько микрометров.

Металлы и сплавы:

- 1) алюминий используют для защиты чёрных металлов от коррозии. При нагреве за счёт диффузии алюминия в основной металл образуется упрочнённый слой, стойкий к окислению при высокой температуре. Плазменное напыление порошка алюминия используют для образования электропроводного покрытия;
- 2) цинк обеспечивает защиту чёрных металлов от коррозии;

- 3) сплавы цинка с алюминием напыляют для получения антикоррозионного покрытия. При высоком содержании алюминия (~50%) эти сплавы малопластичны, из них трудно изготовить проволоку волочением, для напыления такие сплавы используют в виде порошка;
- 4) медь и её сплавы обычно применяют для наплавки, напылением наносят только электропроводные покрытия;
- 5) молибден используют в качестве подслоя перед последующим нанесением на него желаемого материала. Кроме того, он пригоден для повышения износостойкости и коррозионной стойкости к соляной кислоте. Напыление порошка молибдена осуществляют плазменным способом;
- 6) вольфрам – наиболее тугоплавкий из всех материалов. Его необходимо применять в чистом виде при незначительном содержании примесей, особенно железа. Он интенсивно окисляется на воздухе при сравнительно невысокой температуре. В инертной и восстановительной средах может выдерживать высокую температуру. Вольфрамовое покрытие имеет хорошее сцепление с керамическими поверхностями. При плазменном напылении получают вольфрамовое покрытие, значительно превосходящее соответствующие покрытия, наносимые электролитическим или вакуумным (сублимационным) способом;
- 7) коррозионно-стойкая сталь и нихром используются как напыляемый материал не только в форме проволоки, но и в виде порошка, который имеет некоторые специфические особенности. Покрытие из коррозионно-стойкой стали обладает антикоррозионными свойствами и износостойкостью. Нихромовые покрытия являются антикоррозионными и жаростойкими. При напылении керамики и других материалов слой нихрома может быть использован как подслой;
- 8) прочие сплавы – сплавы олова со свинцом (бabbит) и антифрикционную бронзу можно применять в виде порошка и проволоки. Оба сплава используют в подшипниках.

Композиционные материалы. Для напыления иногда используют плакированные порошки, частицы которых состоят из ядра-основы размером от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров, окружённого слоем второго компонента (толщина слоя 2–3 мкм). Такие материалы, по внешнему виду являясь однородными, представляют собой, в сущности, механическую смесь различных компонентов.

В процессе напыления плакированным порошком под действием высокотемпературной газовой струи происходят экзотермические реакции между компонентами порошка с образованием между ними интерметаллического соединения. Теплота экзотермических реакций способствует

повышению прочности сцепления покрытия с основным металлом. К числу сочетаний материалов, склонных к экзотермическим взаимодействиям, в частности относится никель-алюминий. Покрытия из алюминиида никеля может успешно работать при высоких температурах (до 650°C), обладая высокой термостойкостью и износостойкостью.

Композиционное покрытие в виде сочетания двух разнородных материалов обладает свойствами, присущими каждому из материалов. В частности, плакированный порошок, сочетающий никель с графитом, обеспечивает получение покрытия с хорошей обрабатываемостью. При этом стойкость к эрозионному износу удовлетворительная. Композиционное покрытие, содержащее Ni, Cr и Al, обладает стойкостью к окислению в воздушной среде при высокой температуре. Этот композиционный материал пригоден также для напыления подслоя под керамику. Композиционный материал, сочетающий молибден с алюминием, применяют для нанесения покрытий на поверхности подшипников скольжения и реставрации деталей из углеродистой стали. При этом он обладает высокой износостойкостью.

Существуют плакированные порошки, состоящие из кобальткарбида вольфрама, никеля-карбида хрома и др., позволяющие получать износостойкие покрытия, а также порошки, сочетающие никель с фтористым кальцием, оксид никеля с фтористым кальцием, алюминий или алюминиевую бронзу с полиэфиром для нанесения покрытий, обладающих низким коэффициентом трения.

Самофлюсующиеся сплавы. Нанесение покрытий из самофлюсующихся сплавов и последующее их оплавление позволяет получать слои без пор и с высокой плотностью.

Самофлюсующиеся сплавы представляют собой сплавы на основе никеля, хрома и никеля или кобальта, содержащие добавки бора и кремния. Покрытия из этих сплавов обладают высокой износостойкостью, коррозионной стойкостью и стойкостью к окислению в воздушной среде при высоких температурах. Из-за низкой пластичности эти сплавы представляют для напыления только в виде порошков.

Керамика. К керамике относят такие соединения, как оксиды металлов, бориды, нитриды, силикаты и карбиды. Керамика является тугоплавким материалом, для напыления которого необходима температура до 3000°C, так что газопламенное напыление не обеспечивает температуры, необходимой для напыления керамическими материалами. При использовании плазменного и детонационного способов температура плавления напыляемого материала не имеет значения, поэтому этими способами можно напылять любые материалы, способные к расплавлению при нагреве.

Оксиды. По сравнению с другими высокотемпературными материалами, оксиды имеют наиболее низкие теплопроводность и электропрово-

димось, и значительную прочность при высоких температурах. Оксиды можно разделить на простые и сложные. Простые оксиды представляют собой соединение одного металла с кислородом, а сложные – соединения оксидов двух или более. Наиболее высокие температуры, как правило, могут выдерживать простые оксиды. Сложные оксиды в большинстве своём являются тугоплавкими материалами, однако их температура плавления более низкая, чем температура плавления входящих в них компонентов.

Не все оксиды при высоких температурах химически устойчивые. Например, в восстановительной среде при высокой температуре оксиды таких металлов, как церий, хром, никель, олово, титан и цинк, легко восстанавливаются и превращаются в металлы или низшие оксиды, имеющие невысокие температуры плавления. Напротив, тугоплавкие оксиды ниобия, марганца, ванадия и урана становятся неустойчивыми при нагреве в окислительной среде, превращаются в оксиды более высокой валентности, имеющие более низкую температуру плавления. При нагреве оксида хрома до 2000°C начинается его активное испарение, тогда как оксиды бериллия, магнезия, циркония и тория остаются устойчивыми до высоких температур. Температура, при которой эти материалы становятся неустойчивыми и взаимодействуют при нагревании в вакууме с другими металлами, очень высока.

Во время нагрева диоксида циркония при температуре около 1200°C протекает эндотермическая реакция, сопровождающаяся усадкой из-за структурных превращений. Эти превращения можно подавить, и такой цирконий называется стабилизированным.

Карбиды. Температура плавления карбидов металлов значительно выше температур плавления самих металлов. Температуры, при которых происходит размягчение карбидов, превышают 3000°C. При нагреве в окислительной атмосфере некоторые карбиды могут размягчаться, однако большинство из них обладает в этих условиях лучшей жаростойкостью по сравнению с жаростойкими металлами, а значительная часть карбидов имеет большую стойкость к окислению, чем углерод и графит. Эта особенность карбидов и достаточный уровень механических свойств при высокой температуре предполагают их использование в качестве жаростойкого покрытия.

Особенно высокой жаростойкостью обладают карбиды кремния и титана. Почти все карбиды имеют высокую теплопроводность и электропроводность, а карбиды кремния, титана и вольфрама, обладая особо высокой твёрдостью, находят широкое применение для изготовления режущих и шлифовальных инструментов, а также для напыления с целью повышения износостойкости. Для напыления, в основном, применяют карбиды вольфрама, хрома, титана, циркония и тантала. Наиболее широкое применение получил карбид вольфрама. Как напыляемые материалы,

карбиды нередко применяют в смеси со связующим материалом. В качестве связующего для карбида вольфрама используют кобальт (12–17%), а для карбида хрома – сплавы никеля (15–25%).

6.5. Прочность сцепления покрытия с основным материалом и между собой

Соединение напыляемого покрытия с основой осуществляется преимущественно за счёт механического сцепления напыляемых частиц с выступами и впадинами на поверхности основы, образованными предварительной обработкой. Этот механизм адгезии покрытия называют анкерным эффектом.

Кроме механического сцепления, прочность сцепления покрытия с основным материалом обеспечивается за счёт ряда других механизмов, включая диффузию компонентов покрытия в основной материал, сплавление и химическое взаимодействие. Поскольку частицы напыляемого материала имеют обычно оксидную плёнку, их сцепление с поверхностью основного материала на некоторых микроучастках происходит через оксидные плёнки.

Повышение прочности сцепления покрытия достигается также за счёт физических связей под действием вандерваальсовых сил. Эти силы, как силы межатомного притяжения, могут возникать только при сближении частиц с поверхностью металла на расстоянии, близком к параметрам кристаллической решётки.

Если на поверхности одного кристалла по какой-либо кристаллографической ориентации происходит рост другого кристалла, то это явление называют эпитаксией, часто наблюдаемой при соприкосновении металлов, сходных по кристаллическому строению и параметрам кристаллической решётки. Это явление наблюдают при осаждении металлов из растворов, электролитическом металлопокрытии или вакуумном осаждении.

Молибденовое покрытие отличается особенно хорошей адгезией к чёрным металлам. При движении частиц молибдена от сопла горелки до поверхности основы происходит их окисление, которое сопровождается интенсивным испарением оксидов. В результате расплавленные частицы молибдена в момент соударения с поверхностью основы имеют очень тонкую плёнку оксидов, которая при соударении разрывается, и чистый молибден, имеющий высокую температуру, вступает в контакт с поверхностью основы. Происходят сцепление частиц молибдена с металлом основы на некоторых участках и образование металлических связей.

Прочность сцепления покрытия с основным металлом в значительной мере зависит от образования промежуточного слоя в переходной зоне.

Окисление поверхности относится к числу факторов, определяющих прочность сцепления покрытия с основным металлом. При нагреве ме-

талла в воздухе на его поверхности образуются оксиды, свойства которых зависят от уровня температуры и продолжительности нагрева до этой температуры. Если на поверхности основного металла остаётся неразрушенная оксидная плёнка, то диффузионное соединение образоваться не может. Следовательно, наличие прочной оксидной плёнки на поверхности основного металла исключает получение хороших результатов при напылении. При температуре основного металла выше 700°C на его поверхности образуется толстая оксидная плёнка (состоящая из FeO), высокая вязкость которой исключает её разрушение при ударных столкновениях с ней частиц. Это, в свою очередь, исключает диффузию материала покрытия в основной металл.

Разрушение оксидной плёнки при охлаждении сопровождается отслоением находящегося на ней покрытия, в частности, алюминиевого. Разрушение происходит преимущественно между оксидной плёнкой и основным металлом, что свидетельствует о более высоком уровне сцепления между покрытием и оксидной плёнкой. Таким образом, при напылении на основной металл, покрытый толстой оксидной плёнкой, получаемое покрытие имеет слабую прочность сцепления с основным металлом. Это значит, что задача получения покрытия с высокой прочностью сцепления с основой требует, чтобы перед напылением поверхность основного металла (температура которого при напылении не должна превышать оптимальной) была покрыта лишь тонкой оксидной плёнкой, например, такой, какой она бывает после механической обработки для придания поверхности изделия должной шероховатости.

При сцеплении частиц между собой внутри покрытия действуют те же механизмы, что и при взаимодействии покрытия с поверхностью основного металла. В частности, взаимодействие (прилипание) частиц между собой достигается путём их простого механического сцепления (анкерный эффект), а также за счёт диффузии, эпитаксии и физической связи под действием вандерваальсовых сил.

При нагревании на поверхности нагретых (или расплавленных) металлических частиц образуются оксиды или нитриды, между которыми собственно происходит взаимодействие. Эффективность взаимодействия значительно зависит от различия коэффициентов линейного расширения напыляемого металла и оксидов (нитридов). При охлаждении усадка металлических частиц происходит в большей степени, чем усадка оксидов, и чем значительней это различие, тем хуже условия образования напыляемого покрытия.

6.6. Пористость и плотность покрытия

В табл. 6.4 представлены характеристики (достоинства и недостатки) различных способов газотермического напыления.

Характеристики различных способов газотермического напыления

Параметр	Газопламенное напыление	Плазменное напыление	Детонационное напыление
Напыляемые материалы	При восстановлении деталей для получения износостойких покрытий применяются порошковые сплавы системы Ni – В – Cr – Si, а для напыления подслоев – экзотермические сплавы. Для напыления стальных и чугунных деталей, работающих в условиях трения, применяют стальные проволоки с содержанием 0,3–0,8% С, хромистые с содержанием 13% Cr, аустенитные, хромоникелевые и др.	Для восстановления изношенных поверхностей напылением с оплавлением широкое применение получили порошковые самофлюсующиеся сплавы системы Ni – Cr – В – Si, в которые нередко добавляют карбиды, бориды тугоплавких металлов (вольфрам, ванадий, хром, молибден) для образования композиционных сплавов с более высокими физико-механическими свойствами. В последние годы отечественная промышленность расширяет выпуск биметаллических терморегулирующих порошковых сплавов, обладающих экзотермическими свойствами, повышающими прочность сцепления покрытия с основой	Можно получать покрытия из любых материалов, тугоплавких соединений, оксидов и др. Для получения износостойких покрытий с целью восстановления деталей применяют оксиды Al ₂ O ₃ , самофлюсующиеся сплавы ПГ-СР СНГН, ВСНГН (65% WC и 35% СНГН). Для повышения износостойкости используют карбиды: WC, TiC, Cr ₂ O ₃ , борид хрома CrB ₂ с добавлением 8–20% Ni или Co

Параметр	Газопламенное напыление	Плазменное напыление	Детонационное напыление
Достоинства	Технология пламенного напыления довольно проста, а стоимость оборудования и затраты на эксплуатацию низкие. В связи с этим способ является наиболее распространённым	Более высокая температура рабочего тела. Повышенная кинетическая энергия расплавленных частиц, обеспечивающая более высокую плотность покрытия и лучшее их сцепление с подложкой. Позволяет наносить покрытия из различных материалов на разнообразный материал основы. Использование инертных газов без кислорода способствует уменьшению окисления напыляемого материала и поверхности детали	Кинетическая энергия частиц в сотни раз выше, чем в случае пламенного и плазменного нанесения покрытий. Высокая кинетическая энергия частиц позволяет получать покрытия, температура плавления которых выше температуры взрыва. Плотность покрытий близка к плотности компактного материала
Недостатки	Высокая пористость получаемых покрытий (до 15%). Ограниченность выбора материалов для напыления температурным пределом. Температура пламени газовой горелки не превышает 2850С, поэтому этим методом нельзя получить покрытия из наиболее тугоплавких материалов	Пористость получаемых покрытий до 10%. При нанесении покрытий на небольшие детали процесс напыления малоэффективен из-за больших потерь напыляемого материала	Низкая производительность (5–7 выстрелов в секунду). Необходимость создания специального помещения из-за высокого уровня шума

Пористость покрытий. Чешуйчатое строение металлических покрытий, состоящих из наложенных друг на друга частиц, обуславливает пористость покрытий и их проницаемость для жидкостей или газов. В одних изделиях (валы, втулки, работающие в условиях жидкого или полужидкого трения) пористость напылённых покрытий играет положительную роль, в других (изделия, работающие в условиях атмосферной коррозии или агрессивных сред) она вредна.

Напыление на пары трения металлических покрытий существенно снижает коэффициент трения. Смазочные материалы легко распространяются по всей поверхности такого покрытия, прочно удерживаются на ней и заполняют поры. Поэтому в случае прекращения подачи смазочного материала заедание пары наступает значительно позднее. Наиболее высокой износостойкостью обладают покрытия из молибдена.

При воздействии абразивных материалов высокую износостойкость обеспечивают покрытия из самофлюсующихся сплавов Cr – W – Ni, а также керамические покрытия из оксида алюминия, пропитанные фенольными смолами.

Проницаемость покрытия уменьшается с возрастанием толщины напылённого слоя. Так, увеличение толщины никелевого покрытия с 0,2 до 0,4 мм снижает его проницаемость в 10 раз.

После напыления покрытий в целях устранения пористости их обрабатывают лаками, красками и т.п. Вместе с тем в ряде случаев стараются получить большую пористость покрытий. Например, пористые покрытия из меди, наносимые на трубы теплообменных аппаратов, обеспечивают значительное увеличение теплопередачи теплообменников и снижение их массы.

6.7. Термообработка после нанесения покрытия

В состоянии после напыления покрытие имеет обычно пористую структуру с большим содержанием кислорода, азота и водорода. Кроме того, покрытие в этом состоянии характеризуется низкой прочностью сцепления с основным металлом, слабым сцеплением частиц внутри покрытия и неудовлетворительной пластичностью. Повышение свойств таких покрытий требует последующей термообработки.

6.7.1. Термообработка

В табл. 6.5 представлена плотность вольфрамowego покрытия в зависимости от температуры термообработки после напыления.

Снижение фракции порошкового напыляемого материала сопровождается уменьшением пористости получаемого покрытия. Для повышения механических свойств после напыления рекомендуется термообработка в печи с водородной атмосферой.

Таблица 6.5

Относительная плотность вольфрамовых покрытий, %

Размер зёрен порошка, мкм	После напыления	После напыления и термообработки при температуре, °С				
		1700	1800	2000	2200	2400
8	82,8	84,5	92,6	95	94,9	-
44	83,5	-	89,5	89,8	90,6	92,6
44–74	81,4	82,5	87	86,3	87,9	89,4

Особенно высокое содержание кислорода характерно для вольфрамового покрытия в состоянии после напыления. В связи с этим покрытие обычно подвергают последующему отжигу, в течение которого происходит снижение содержания кислорода за счёт восстановления оксидов.

Отжиг покрытия проводится при достаточно длительной выдержке при высокой температуре, а поскольку при этой температуре находится и основной металл, структурные и иные его изменения приводят к возникновению термических напряжений, противопоказанных для многих марок основного материала.

Обработка напылённого покрытия, сочетающая нагрев (без плавления покрытия) с приложением давления (на короткое время), сулит перспективу повышения плотности покрытия, прочности его сцепления с основным металлом и прочности сцепления частиц внутри покрытия. Обработке с последующим оплавлением подвергают покрытия, напылённые газопламенным и плазменным способами сплавами (самофлюсующимися) на основе никеля, содержащими хром, кремний и бор.

В структуре между основным металлом и покрытием из самофлюсующегося никелевого сплава в состоянии после напыления между частицами покрытия видны многочисленные пустоты (поры), сцепление покрытия с основным металлом не имеет достаточной прочности. То же покрытие в состоянии после обработки, включающей нагрев до 900°С и опрессовку при давлении ~48 МПа, приобретает однородную структуру без пор с равномерно рассеянными мелкодисперсными частицами вторичных фаз. На границе между покрытием и основным металлом чётко просматривается диффузионный слой. Покрытие в целом характеризуется радикальным повышением плотности и прочности сцепления с основным металлом. Прочность такого покрытия превышает 294,2 МПа.

6.7.2. Диффузионная обработка

Термообработка с целью получения диффузионного слоя на границе покрытия с основным металлом придаёт последнему жаростойкость и коррозионную стойкость.

Один из способов поверхностного упрочнения стали, в частности, включает напыление на стальное изделие алюминиевого покрытия толщиной 0,13–0,4 мм, нанесение на поверхность покрытия смеси кремнийорганической смолы с алюминиевым порошком и нагрев таких слоёв до 800–900°C в течение 5–10 мин с последующим охлаждением на воздухе. Кроме того, на поверхность изделия наносят защитный слой жидкого стекла или раствора буры толщиной 0,3 мм с последующим нагревом до 800–850°C и выдержкой в течение 30–180 мин. Во время выдержки при высокой температуре на границе покрытия с основным металлом происходит взаимная диффузия алюминия и железа с образованием различных интерметаллических соединений и твёрдого раствора. При этом следует иметь в виду, что на участках неполной адгезии покрытия к поверхности основного металла, а также на участках пор и трещин, выходящих из покрытия на поверхность основного металла, слой взаимной диффузии алюминия-железа не образуется. Кроме того, при температуре нагрева выше 900°C в покрытии и легированном слое могут возникать трещины.

6.7.3. Оплавление напылённых покрытий из самофлюсующихся сплавов

Покрытия самофлюсующимися сплавами, особенно при большой их толщине, предпочтительней наносить способом газовой или дуговой наплавки. Однако дуговая наплавка сопровождается значительным проплавлением основного металла, что приводит к сильному перемешиванию наплавленного металла с металлом основы. При толщине наплавленного слоя примерно 3,2 мм в металле покрытия содержится 30% металла основы, что позволяет получить наплавленный слой с заданным составом и желаемыми свойствами.

После газопламенного напыления самофлюсующимися сплавами пористость покрытия достигает 25% при неудовлетворительной адгезии к основному металлу.

В связи с этим возникает необходимость последующей уплотнительной термообработки. Самофлюсующиеся сплавы представляют собой высокопрочные сплавы на основе никеля и кобальта с добавлением не менее 1,5% В и Si. Эти два элемента, превосходящие никель, кобальт и железо по химическому сродству к кислороду, при оплавлении покрытия в процессе его уплотнительной термообработки образуют оксиды B_2O_3 и SiO_2 , растворяющиеся как стекловидные вещества и выходящие на поверхность покрытия в виде шлака. В результате после охлаждения получают плотное покрытие, не имеющее пор. Такая обработка, кроме уплотнения покрытия, обеспечивает его полное сплавление с основным металлом в связи с тем, что тонкий слой последнего во время термообработки также переходит в расплавленное состояние.

7. ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ НАПЛАВКОЙ И НАПЫЛЕНИЕМ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО И ГОРНОРУДНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Наплавка широко применяется для восстановления и упрочнения деталей оборудования фабрик окускования, доменных, сталеплавильных и прокатных цехов.

7.1. Наплавка

7.1.1. Наплавка молотков молотковых дробилок

Молотки известковых дробилок агломерационной фабрики предназначены для измельчения известняка, поступающего в шихту агломерата. Основным требованием, обеспечивающим высокую работоспособность молотков, является стойкость против истирания и частых ударных нагрузок. Этим требованиям вполне соответствует биметаллический молоток, изготовленный из недорогого пластичного металла (штампованная заготовка из стали Ст5) с рабочей поверхностью, наплавленной износостойким сплавом.

Наплавляют рабочие поверхности – торец и две боковые грани. Молотки наплавляют слоем отбелённого чугуна. Наплавку выполняют чугунной литой электродной лентой под флюсом (низкокремнистый флюс АН-28).

7.1.2. Наплавка валков коксовых дробилок аглофабрик

Коксовые валковые дробилки агломерационных фабрик предназначены для измельчения кокса, поступающего в шихту при производстве агломерата. Валки изготавливают сборными со сменными рабочими бандажами. В процессе эксплуатации валков на их поверхности в результате интенсивного абразивного износа образуются кольцевые выемки.

Главная особенность процесса автоматической наплавки бандажей, обеспечивающей минимальные простои дробилок, является необходимость наплавки валков непосредственно в рабочей клетке или на специальном стенде, установленном возле дробилок в собранном виде с буксами. Для наплавки валков непосредственно в клетки применяют порошковую проволоку с внутренней защитой марок ПП-У15Х12М-0 и ПП-У20Х12ВЗФ, а при наплавке под флюсом на отдельной установке – порошковую проволоку марки ПП-У25Х25Н4С4 (наплавленный металл типа сормайт 1).

В табл. 7.1. представлены характеристики наплавленного металла, выполненного перечисленными порошковыми проволоками.

Таблица 7.1

Химический состав и твёрдость наплавленного металла

Марка электродного материала	Способ наплавки	Химический состав наплавленного металла, %					Твёрдость HRC
		C	Cr	Si	Mn	Прочие	
ПП-У15Х12М-0	Автоматическая без защитного газа и флюса	1,6	11,5	0,5	0,7	0,85 Mo	40–45
ПП-У20Х12В3Ф		1,75	11	0,6	0,8	3,5W; 1,5V; 0,5Ni	45–50
ПП-У25Х25Н4С4	Автоматическая под флюсом АН-20	2	24	3,5	1,8	3,6Ni	48–54

7.1.3. Наплавка колосников грохотов дробилок агломерата

На агломерационных фабриках грохоты работают в наиболее тяжёлых условиях по сравнению с другими видами оборудования. Динамические, абразивные и тепловые нагрузки вызывают интенсивный износ деталей грохота. Колосники изнашиваются более чем на 50% по высоте сечения, причём их износ особенно значителен в средней части (для крупных решёток) и в местах крепления (для мелких решёток).

Наиболее эффективна наплавка сплошным слоем в поперечном направлении колосника.

Технология наплавки: сначала колосник наплавляют с одного конца на участке длиной 120–150 мм. В то время, как этот участок остывает, такой же участок наплавляют на другом конце колосника. Затем снова наплавляют участок на первом конце и т.д.

При такой наплавке исключается деформация колосников. Наплавку производят постоянным током обратной полярности порошковой проволокой ПП-АН-124 диаметром 2,8 мм, ток 500–520 А, напряжение 28–30 В, скорость подачи электрода 210 м/ч.

Стойкость колосников, упрочнённых таким методом, повышается в 2,5 раза по сравнению с неупрочнёнными колосниками.

На Челябинском металлургическом комбинате (ЧМК) применяют колосники, полученные из специального прокатного профиля из стали 60С2, разделённого пополам. Образующийся трапециевидный профиль наплавляют порошковой проволокой ПП-3Х2В8 слоем толщиной 7–8 мм. Стойкость колосников достигает нескольких межремонтных периодов работы агломерационной машины.

7.1.4. Наплавка зубьев звёздочек привода агломерационной машины

На Коммунарском металлургическом комбинате зубья приводных звёздочек машин восстанавливают на рабочем месте. Применяют полуавтоматическую наплавку порошковой проволокой ПП-АН-3 ванным способом. Наплавку выполняют полуавтоматом А-765 в комплекте с источниками питания ВКСМ-1000 или ПС-500. Режим наплавки: $I_{св} = 480-500$ А, $U = 28-30$ В. Накопление тепла, характерное для ванного способа, позволяет ускорить процесс восстановления зубьев за счёт присадочного материала из арматурной стали, который вводят в зону плавления электрода. Для предотвращения растекания расплавленного металла вокруг зуба делают форму из стальных пластин, которые в дальнейшем легко удаляются. Зуб выставляют так, чтобы его наплавка выполнялась в нижнем, наиболее производительном положении. Контроль геометрии зуба и шага между зубьями осуществляют специальным шаблоном.

7.1.5. Наплавка деталей загрузочных устройств доменных печей

Форсирование работы доменных печей, связанное с увеличением давления газа на колошнике, приводит к резкому снижению стойкости деталей загрузочных устройств. Одним из эффективных способов повышения износостойкости деталей засыпных аппаратов является упрочнение их рабочих поверхностей методом наплавки. Используют карбидохромовую порошковую ленту ПЛ-АН-110, композиционный сплав на основе карбида вольфрама, электроды КХН-15.

Оптимальный вариант упрочнения деталей засыпных аппаратов доменных печей сплавом КХН-15 выбирают из следующих приёмов:

1. По подслою, наплавленному порошковой проволокой ПП-3Х2В8 (контактная поверхность большого конуса и его чаши).
2. Наплавка двух подслоев: первого – порошковой проволокой ПП-3Х2В8, а второго – проволокой Св-08 (по контактной поверхности чаши малого конуса).
3. По подслою сплава сормайт 1 (контактная поверхность малого конуса).

Контактные поверхности конуса и чаши наплавляют также печным способом композиционным сплавом (релит + мельхиор). При этом средний срок службы таких устройств на доменных печах в 3–4 раза больше, чем при наплавке порошковыми лентами ПЛ-АН-101 и ПЛ-АН-111. Значительное повышение срока службы засыпных аппаратов объясняется высокой износостойкостью сплава, связанной с образованием теневого эффекта за счёт избирательной эрозии матрицы – пластичного мельхиора и твёрдого наполнителя (релита) – при действии газообразного потока.

Состояние поверхности конуса и чаши после длительной эксплуатации при 430–450°C (температура дисперсионного твердения сплава МНМц-60-20-20) подтверждает возможность использования этого сплава

для наплавки засыпного аппарата. Он может выдерживать значительные перегревы колошника (800–900°C), не ухудшая работы. Это объясняется тем, что в процессе печной наплавки мельхиор за счёт диффузии в него железа, вольфрама и углерода приобретает более высокую температуру плавления по сравнению с чистым сплавом МНМц-60-20-20 (1050°C). Кроме того, в процессе эксплуатации поверхность, наплавленная композиционным сплавом, покрывается прочной оксидной плёнкой, имеющей высокую температуру плавления.

Одними из важных свойств композиционного сплава (релит + мельхиор) являются высокие пластические свойства связки (мельхиора), что обеспечивает хорошую плотность между контактными поверхностями большого конуса и чаши. Чем меньше модуль упругости, тем меньше поперечная жёсткость чаши при прочих равных условиях. Учитывая, что модуль упругости сплава мельхиор МНМц-60-20-20 в два раза меньше, чем сплавов, наплавленных порошковыми лентами ПЛ-АН-101 и ПЛ-АН-111, то и поперечная жёсткость такой чаши будет меньше и, следовательно, плотность контакта лучше.

7.1.6. Упрочнение быстроизнашивающихся поверхностей

Для упрочнения быстроизнашивающихся поверхностей используют два метода: наплавка композиционным сплавом непосредственно на деталь методом пропитки износостойких зёрен сплавом-связкой в термических печах и армирование поверхностей унифицированными футерованными элементами (УФЭ), предварительно наплавленными композиционным сплавом.

Методом пропитки упрочняют контактные поверхности тарели и седла газоотсекающих клапанов диаметром 800 мм и другие детали, имеющие форму тел вращения.

Особо следует отметить армирование рабочих поверхностей УФЭ, позволяющее упрочнять любые по форме и размерам детали. Так армируют узлы и детали загрузочного устройства: балку-рассекатель, внутреннюю коническую поверхность седла газоотсекающего клапана, приёмную часть затвора, поверхность челюстей шихтового затвора, защитные кольца штанги, внутреннюю поверхность воронки, наружную поверхность склизи и др.

УФЭ представляет собой плоскую трубу размером 120x25 мм с толщиной стенки 5 мм, предварительно наплавленную композиционным сплавом. Трубу изготавливают из стали 10 протяжкой через специальные валки, при этом отклонение от номинальных размеров не более 2% по ширине и 10% по толщине.

Наплавку выполняют двумя способами:

1. Трубу собирают в пакеты по 20 шт.; нижнюю часть герметизируют приваркой заглушек, а верхнюю приваривают к трубчатой решёт-

ке, которая служит основанием контейнера для сплава-связки. Сварные швы у труб и контейнера проверяют на плотность керосином. После этого полости труб заполняют зёрнами релита или дроблёными твёрдыми сплавами типов ВК, ТК, (Ti, Cr)B₂ или КНТ. В качестве сплава-связки используют марганцевый мельхиор марки МНМц-60-20-20. Нагрев ведут с максимально возможной скоростью до 1150°С и после двухчасовой выдержки охлаждают со скоростью примерно 100°С/ч в печи до 450°С, а затем на воздухе. Наплавленные трубы отделяют от трубной решётки газовой резкой, слой окалины удаляют дробеструйной обработкой.

2. Для многократного использования оснастки, увеличения производительности наплавки предлагают наплавлять трубы с использованием автовакуумного эффекта. Рост плёнок, образующихся на внутренних стенках контейнеров, наблюдается только при нагреве до 600°С, при дальнейшем же повышении температуры толщина плёнок быстро уменьшается. Явление поглощения газов металлами и самопроизвольная очистка поверхностей при нагреве в замкнутой воздушной среде без доступа воздуха получило название автовакуумного эффекта. Пакеты устанавливают в ванны со сплавом-связкой при температуре 20–1200°С. После выдержки в печи при 1150+50°С в течение 4,5 ч их снимают с ванн и заменяют новыми. Общее время наплавки не превышает 12 ч. После наплавки элементы очищают от окалины дробеструйной обработкой. В случае необходимости их можно гнать по шаблону или в штампе, нагревая на 20–50°С выше температуры начала кристаллизации матрицы композиционного сплава. Для матрицы из сплава МНМц-60-20-20 температуры нагрева при гибке принимают 1100–1200°С.

УФЭ укладывают на быстро изнашивающиеся поверхности, приваривают малоуглеродистой проволокой марки Св-08Г2С в среде углекислого газа. Для предохранения от износа поверхности сварного шва облицовывают композиционным сплавом электродуговым способом специальными трубчатыми электродами.

УФЭ с изменяемой толщиной композиционного сплава армируют рабочие поверхности, воронки, лотки защитных колец и другие детали для бесконусного загрузочного устройства доменной печи.

7.1.7. Наплавка буров для вскрытия чугунных лётков доменных печей

При использовании безводных лёточных масс прочность чугунной лётки повысилась настолько, что возникли трудности при вскрытии её обычными бурами, изготовленными из стали Ст3.

Наплавку буров релитом производят вручную газосварочной горелкой с применением буры, при этом поверхность, подлежащую наплавке, нагревают газосварочной горелкой до температуры 600–650°С. С целью

исключения заточки наждачным кругом режущей кромки бура наплавку следует вести с применением формирующей пластины.

На наплавку одного бура расходуют 30 г материала. На вскрытие чугунной лётки такими бурами затрачивают 2–3 мин и расходуют один бур.

7.1.8. Наплавка цапф металлургических ковшей

Изношенные цапфы чугуновозов восстанавливают с помощью втулок. Для увеличения срока службы втулок их наплавляют порошковой проволокой ПП-3Х2В8 под флюсом АН-20 по следующему режиму.

Ток, А	320–340
Напряжение на дуге, В	30–32
Число слоёв наплавки	3–4
Шаг наплавки, мм	6–7
Скорость наплавки (окружная скорость вращения втулки), мм	35–46
Температура предварительного подогрева, °С	300–350

После наплавки втулки помещают в утеплённый короб для замедленного охлаждения и подвергают термической обработке по режиму: нормализация при 850°С, выдержка при этой температуре 0,5 ч, охлаждение на воздухе. Затем отпуск 700°С с выдержкой 2,5 ч, охлаждение на воздухе. Обработка – механическая (шлифовка).

Эффективен путь замены бронзовых втулок биметаллическими втулками, состоящими из стального корпуса и бронзовой рабочей поверхности, нанесённой путём наплавки проволокой БР АЖМц-10-3-1,5 под слоем флюса АН-20. Твёрдость наплавленного слоя в этом случае составляет НВ 170–175, а твёрдость цельных втулок из бронзового литья значительно меньше – НВ 120–125.

Применение биметаллических втулок позволяет экономить дорогостоящую бронзу и многократно использовать стальную основу.

7.1.9. Наплавка плунжеров пакетирующих прессов

Наиболее эффективным способом повышения срока службы плунжеров является наплавка их порошковой проволокой ПП-3Х2В8 под слоем флюса АН-20.

Перед наплавкой плунжеры нагревают до температуры 350–400°С. Для наплавки используют постоянный ток обратной полярности, т.е. катодом служит плунжер, анодом – электрод. Скорость наплавки порошковой проволокой ПП-3Х2В8 диаметром 3,6 мм – 40 м/ч при скорости подачи 56 м/ч. Сварочный ток 350 А при напряжении 25–30 В.

7.1.10. Наплавка хоботов завалочных машин

Низкая стойкость хоботов завалочных машин приводит к повышенному их расходу и к простоям завалочных машин во время замены хоботов.

Для изготовления хоботов используют сталь 35ХМЛ. После токарной обработки производят наплавку головки на длине 1865 мм порошковой проволокой ПП-3Х2В8 в два слоя толщиной по 2,5 мм и проволокой из стали Х18Н9Т в один слой толщиной 2,5 мм. Перед наплавкой хобот подогревают газовой горелкой до 300°С и после наплавки до 350°С. Навивку защитного слоя из проволоки из стали 30ХГСА диаметром 12 мм производят непосредственно на наплавочной машине.

Через 40 суток после начала эксплуатации проводят ремонт хобота. Выполняют повторную навивку защитного слоя по вышеуказанной технологии проволокой из стали 30ХГСА диаметром 12 мм. Приварку первого и последнего витков, повернутых на 90° к головке, и приварку по всей длине оплётки в четырёх местах на ширине 50 мм проводят на наплавочной машине. В местах скалывания твёрдого сплава проводят ремонт замковой части. В этих местах приваривают пластины из стали Ст3 размером 400x80x10 мм.

После такого ремонта хобот эксплуатируется более 6 месяцев, причём повторные ремонты не производятся.

7.1.11. Наплавка кернов клещевых кранов

Керны клещевых кранов работают в условиях циклического нагружения и циклического нагрева-охлаждения. Керн разогревается до 1000–1200°С, поэтому после переноса 4–6 слитков его охлаждают, погружая клещевину в бак с водой. На большинстве заводов керны изготавливают из стали 45 с электрошлаковой наплавкой носовой части сталью 3Х2В8. В качестве электрода используют пруток проката из стали 3Х2В8 диаметром 20 мм. Твёрдость наплавленного металла получается НВ 420, временное сопротивление разрыву – 1080 Н/мм².

Перед наплавкой в головной части керна сверлят отверстие диаметром 30 мм на глубину 30 мм. Наплавку осуществляют под молотым плавиковым шпатом либо под флюоритовым концентратом. Эти материалы перед наплавкой прокаливают при температуре 800–1000°С в течение 1 ч. Применение плавикового шпата обеспечивает минимальное окисление легирующих примесей. Процесс электрошлаковой наплавки представлен на рис. 7.1.

Процесс электрошлаковой наплавки возбуждают кусочком флюса АН-25, электропроводного в твёрдом состоянии. Электрод 1 закорачивают через кусочек флюса с наплавляемой заготовкой 5. Место сварки засыпают молотым плавиковым шпатом. При прохождении сварочного тока через контактный кусочек флюса последний расплавляется, после чего расплавляется плавиковый шпат, образуя шлаковую ванну с температурой 2000°С. При этом поверхность заготовки оплавляется, а затем электрод плавится. В результате устанавливается электрошлаковый процесс. Жидкая шлаковая и металлическая ванны удерживаются в зоне

плавки охлаждаемым водой медным кокилом 4. Металл электрода каплями стекает на оплавляемую поверхность заготовки и сплавляется с ней, образуя металлическую ванну 3. По мере оплавления в шлаковой ванне 2 электрод автоматически подаётся в зону сварки. После того как расплавится необходимое количество металла, подачу тока прекращают, и процесс наплавки заканчивается.

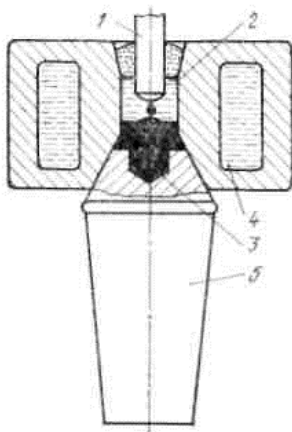


Рис. 7.1. Схема процесса наплавки керна

Режим наплавки следующий: сварочный ток 1000–1100 А, напряжение 18–22 В, длительность наплавки 1,5 мин. При этом на один kern расходуют следующее количество наплавочных материалов: электродного металла 0,6 кг, плавикового шпата 0,1 кг и флюса 0,01 кг.

Наплавленный цилиндрический конец заготовки подвергают нагреву в печи до 1200°C и обжатю в штампе под молотом для придания керну конической формы.

7.1.12. Наплавка подпятника домкратной тележки

Технология изготовления подпятника предусматривает применение наплавки бронзой на основание подпятника из малоуглеродистой стали. Наплавку производят бронзовой проволокой Бр. КМц-3-1 диаметром 3 мм на серийном манипуляторе УСМ-5000.

Для получения качественно наплавленного металла применяют метод наплавки одним плавящимся электродом в среде смеси защитных газов серийной сварочной головкой АБС с закреплённой на ней горелкой. Газовую смесь из 95% аргона и 5% кислорода подают через расходомерную колонку из баллонов.

Режим наплавки следующий: сварочный ток 400–450 А, напряжение дуги 20–35 В, скорость подачи проволоки 130–150 м/ч, скорость сварки

18 м/ч, расход смеси 25 л/мин. Тщательная зачистка каждого валика от оксидов обеспечивает хорошее сплавление с основным металлом. Валики перекрывают друг друга на половину ширины. Наплавку производят в два слоя: второй слой наплавляют на тех же режимах, но с меньшим количеством кислорода в газовой смеси.

7.1.13. Наплавка прокатных валков

В металлургической отрасли наплавляют около 30% прокатных валков, в результате чего их стойкость повышается в 2–4 раза. Стальные валки восстанавливают электродуговой наплавкой, чугунные валки – электрошлаковой.

В табл. 7.2 даны характеристики наплавочных материалов.

Содержание углерода в материалах, представленных в табл. 7.2, колеблется в пределах 0,16–1,27%. С повышением содержания углерода соответственно увеличиваются твёрдость и износостойкость наплавленного слоя. Однако высокое содержание углерода приводит к образованию трещин при наплавке и повышению трудоёмкости механической обработки наплавленных валков. Таким образом, содержание углерода в сплавах должно находиться в средних пределах.

Термическая усталость наплавленного слоя зависит от механических свойств материала валков при температуре эксплуатации. В интервале 500–800°C (температур нагрева поверхностного слоя) содержание таких элементов, как вольфрам, молибден, ванадий, хром, способствует упрочнению металла. Наличие в сплаве этих же элементов снижает растворимость карбидов и повышает термическую стойкость сплавов благодаря отсутствию фазовых превращений при нагреве до 750–800°C. Содержание в сплаве титана и кремния способствует повышению температуры фазовых превращений.

Таким образом, валки, испытывающие термическую усталость, наплавляют жаростойкими наплавочными материалами, содержащими 3–12% Cr, 2–5% W, 0,5% Mo, 0,5–0,8% V, не более 1% Si и 0,25–0,4% C (например, сплав 5X10B5MФ). Валки, работающие в условиях теплового износа, наплавляют сплавами, содержащими 0,45–0,55% C и 9–11% Cr, 4–6% W, до 1% Mo и V каждого. Сильно нагруженные валки, подверженные выкрашиванию, наплавляют сравнительно вязкими наплавочными материалами, содержащими 0,2–0,25% C, по 4–5% Cr и W каждого, до 1% Mo и V каждого (например, сплав 25X5B5MФ).

Наплавочные материалы можно расположить в порядке возрастания: красностойкости – 30ХГСА, 4Х4В3Ф, 25Х5ФМС, 3Х2В8; термостойкости – 30ХГСА, 25Х5ФМС, 4Х4В3Ф, 3Х2В8; относительно трудоёмкости обработки 30ХГСА, 25Х5ФМС, 4Х4В3Ф, 5Х4В3Ф, 3Х2В8; стоимости – 30ХГСА, 25Х5ФМС, 4Х4В3Ф, 5Х4В3Ф, 3Х2В8.

Таблица 7.2

Химический состав и характеристики наплавочных материалов,
применяющихся для электродуговой наплавки валков

Наплавляемый материал	Химический состав, %										Твёрдость наплавляемого слоя HRC	Температура подогрева валка перед наплавкой, °С	Разновидность метода *)
	C	Si	Mn	Cr	W	V	Mo	Ni	S	P			
30ХГСА	0,16	1,2	1,7	0,7	-	-	-	-	-	-	24–33	25–150	1
3Х2В8	0,32	0,6	0,8	2,5	8,5	0,3	-	-	-	-	44–52	350–400	1; 2
4Х4В3Ф	0,38	1,0	0,8	3,5	2,8	0,3	-	-	-	-	38–45	350–400	2
5Х4В3Ф	0,52	1,11	0,77	3,41	2,61	0,43	-	-	0,04	0,02	52–54	370–400	1; 2
5Х10В5МФ	0,46	0,89	0,19	10,5	6,4	0,76	0,88	-	0,03	0,01	46–52	450–470	2
25Х5ФМС	0,25	1,1	0,6	5,2	-	0,4	1,2	-	-	-	40–46	320–390	2
25Х5В5МФ	0,22	0,78	0,17	6,02	5,58	0,73	0,88	-	0,02	0,02	Нет сведений	450–470	2
3Х3В2М2ФС	0,28	1,0	0,7	3,2	2,5	0,7	2,4	-	-	-	Нет сведений	400–440	2
Сплав ММК-61	1,27	0,65	0,73	1,16	-	-	0,34	1,26	0,02	0,02	42–44	450–500	2
ЛМ70Х3М	0,6	0,45	0,6	4,0	-	-	0,7	-	0,03	0,03	Нет сведений	400–450	1
ЛМ5Х4В3Ф	0,6	0,35	1,0	4,3	2,5	0,4	-	-	0,02	0,02	Нет сведений	400–450	1

Примечание. *) 1 – наплавка тянутой катаной проволокой (лентой); 2 – наплавка порошковой проволокой (лентой)

Блюминги. Для восстановления размеров валков блюмингов и слябингов применяют наплавку их поверхности сплавом 30ХГСА, а для повышения их износостойкости – сплавами 30ХГСА, 5Х4В3Ф, 4Х4В3Ф, 25Х5ФМС. Износостойкий слой, как правило, наплавляют только на первом, наиболее нагруженном, калибре валака.

Заготовочные станы. Валки заготовочных станов наплавляют во всех клетях.

Так, на Макеевском металлургическом заводе валки клетей А, Б, I, II непрерывного заготовочного стана 630 наплавляют сплавом 30ХГСА; клетей III, IV – 5Х4В3Ф; клетей V, VI – 3Х2В8. Валки I–IV клетей непрерывного заготовочного стана 450 этого же завода и валки первой группы непрерывного заготовочного стана 850/730/530 Череповецкого металлургического комбината полностью наплавляют сплавом 3Х2В8. На Краматорском металлургическом комбинате для повышения износостойкости валков непрерывного заготовочного стана 700 и 730 применяют комбинированную наплавку ящичных, ромбических и квадратных калибров. При этом дно калибров наплавляют сплавом 30ХГСА, используя в качестве электрода катанку, а вертикальные стенки – сплавом 3Х2В8, применяя в качестве электрода порошковую проволоку.

Валки клетей V, VI непрерывного заготовочного стана 630 Макеевского металлургического завода часто наплавляют сплавом 3Х3В2М2ФС вместо сплава 3Х2В8, что позволяет почти в два раза увеличить их стойкость.

На Магнитогорском металлургическом комбинате в результате замены стальных кованных валков V и VI клетей непрерывного заготовочного стана 720 литыми валками из стали 150ХНМ стойкость их увеличилась более чем в два раза. В других клетях этого стана установлены валки, наплавленные сплавом 3Х2В8 (клеть А) и сплавом 30ХГСА (клетки I – IV). Наплавленные валки этих клетей характеризуются высокой износостойкостью.

Сортовые, проволочные и штрипсовые станы. Валки черновых групп клетей сортовых, проволочных и штрипсовых станов для повышения их износостойкости в основном наплавляют сплавом 3Х2В8. При этом стойкость таких валков в 2–3 раза выше стальных кованных. Аналогичные результаты были получены при наплавке валков штрипсового стана Магнитогорского металлургического комбината сплавом 5Х4В3Ф и валков сортовых станов Енакиевского и Днепропетровского металлургических заводов сплавами под керамическими флюсами ЖС-450 и ЖС-450/т.

Благодаря наплавке валков черновых клетей штрипсового стана Краматорского металлургического комбината металлокерамическими электродными лентами ЛМ-70Х3М и ЛМ-5Х4В3Ф, длительность работы вал-

ков между перешлифовками в 2–3 раза выше, чем при наплавке валков порошковой проволокой ПП-3Х2В8.

Трубопрокатные станы. На этих станах наплавка валков получила наиболее широкое распространение. В результате наплавки валков прошивных станов порошковой проволокой ПП-3Х2В8 стойкость их увеличивается в 2–3 раза по сравнению с чугунными (за счёт сокращения поломок) и стальными коваными валками.

Все непрерывные трубопрокатные станы работают только на наплавленных валках, причём в настоящее время наблюдается тенденция замены наплавочного материала 3Х2В8 другими сплавами. Так на Первоуральском новотрубном заводе для наплавки валков III–VII клетей вместо сплава 3Х2В8 используют сплав 25Х5ФМС, благодаря чему стойкость валков увеличилась в 1,3–1,9 раза.

7.1.14. Износостойкая автоматическая наплавка прокатных валков

Износостойкая наплавка прокатных валков наиболее эффективна для крупных стальных валков (опорные валки листопрокатных, обжимных и других станов). Толщина наплавляемого рабочего слоя при этом достигает 50–60 мм.

Резкого повышения эффективности достигают наплавкой слоя изменяющейся износостойкости. Характер её изменения соответствует интенсивности износа бочки в процессе износа. Используя две проволоки или катанки различного состава в сочетании с керамическим флюсом ЖСН-5, слой изменяющейся износостойкости наплавляют, управляя процессом по заданной программе.

В табл. 7.3 представлена характеристика наплавки по слоям.

Таблица 7.3

Состав и твёрдость наплавленного слоя

Характеристика	Номер состава наплавленного слоя				
	1	2	3	4	5
Электрод	Св-08А	Св-08ГА	Св-12ГС	Нп-30ХГСА	Нп-10ХГСА
Флюс	ЖСН-5	ЖСН-5	ЖСН-5	ЖСН-5	АН-60
Твёрдость наплавленного слоя после термообработки, НВ	330–355	390–415	445–480	535–555	210–240
Примечание. Термообработка – высокотемпературный отпуск в термокожухе, замедленное охлаждение в термостате.					

Для наплавки валков холодной прокатки малого диаметра (30–60 мм) целесообразной является автоматическая вибродуговая наплавка.

Для наплавки применяют порошковую проволоку диаметром 2,2 мм следующего состава: никель металлический 5,5%; молибден металлический 14%; кобальт металлический 12%; ферротитан (Ti = 28%) 0,5%; ферросилиций (Si = 75%) 0,8%; кремнефтористый натрий 0,5%. Оболочка проволоки – из ленты марки 08кп.

В качестве источника питания используют выпрямитель ВС-300.

Наплавку ведут на обратной полярности в среде углекислого газа, вылет электрода – 16 мм. Для улучшения формирования наплавленного слоя, а также удаления из сварочной ванны шлака (частично остающегося после наплавки предыдущего слоя), наплавочная головка повернута на 60° к оси вращения детали в сторону перемещения головки. Оптимальным шагом наплавки является шаг 3 мм. При уменьшении шага дуга отклоняется в сторону ранее наплавленного валика, что недопустимо снижает сплавление основного и наплавленного металлов. Превышение шага сопряжено с углублением впадин между валиками, что вызывает необходимость увеличения припуска на механическую обработку. Наплавка со скоростью 26 м/ч при смещении в зените на 4 мм обеспечивает качество наплавленной поверхности. При уменьшении скорости наплавки образуются налёты наплавленного металла, а при увеличении толщины наплавленного слоя качество наплавленной поверхности оказывается весьма малое. Оптимальным является сварочный ток 150–180 А.

Как правило, частота вибрации электрода составляет 80 Гц при амплитуде 2 мм. Расход газа, обеспечивающий надёжную защиту зоны наплавки, составляет 600 л/ч.

При наплавке в среде аргона напряжение на дуге в 16 В обеспечивает устойчивость режима и необходимое качество наплавки, а при наплавке в углекислом газе напряжение на дуге составляет 18 В.

7.1.15. Электрошлаковая наплавка валков

Установка У-305 предназначена для наплавки валков трубной электродом из легированного чугуна при восстановлении изношенных чугунных валков и для изготовления новых валков со стальной сердцевиной и чугунным рабочим слоем. Эти валки имеют следующую характеристику: диаметр бочки – 250–450 мм; длина бочки – 400–860 мм; общая длина вала – 1350–2000 мм; масса вала – 300–2000 кг.

Толщина наплавленного слоя составляет 40–50 мм.

Химический состав наплавленного слоя: 3,37–3,69% С; 1,21–1,81% Si; 0,47–1,3% Mn; 1,0–3,3% Ni; 0,7–1,9% Cr; 0,43–0,89% Mo; 0,036–0,074% S; 0,26–0,6% P.

Применение электрошлаковой наплавки даёт возможность изготавливать биметаллические прокатные валки с прочной сердцевиной и износостойким рабочим слоем из легированного чугуна, а также восстанавливать чугунные валки.

7.1.16. Наплавка валков профилегибочных станов

Элементы валков профилегибочных станов изготавливают из стали 9Х. Сложность конфигурации и большой сортамент профилей (освоено более 300 типоразмеров) определяют значительную потребность в дорогостоящей стали.

Неравномерное распределение окружных скоростей по высоте калибра вызывает различие в линейных скоростях поверхностей калибра и профилируемой заготовки. В результате происходит проскальзывание заготовки относительно поверхности валков. Это является основным фактором, влияющим на износ.

Наплавка порошковой проволокой ПП-АН-125 позволяет заменить сталь 9Х на сталь 45. После изготовления заготовки и выточки канавок под наплавку производят наплавку порошковой проволокой ПП-АН-125 (диаметр проволоки 3 мм, флюс марки АН-20), постоянным током 280–320 А обратной полярности. Напряжение на дуге составляет 28–32 В; скорость наплавки (окружная скорость вращения элемента) – 56 м/ч; шаг наплавки – 5–6 мм; температура предварительного подогрева 300–350°С. Обычно наплавляют один-два слоя.

Наплавленную партию деталей нагревают до 600–650°С и охлаждают с печью. Затем выполняют необходимую механическую обработку.

Наплавленные элементы из стали 45 по износостойкости превосходят элементы из стали 9Х в 2,5–3 раза при равной стоимости изготовления.

7.1.17. Наплавка роликов рольгангов

Рабочими органами рольгангов являются ролики, изготавливаемые кованными, пустотелыми из стали 40 или 50. Наиболее нагруженные станинные ролики прокатных станов изготавливают цельноковаными из стали типа 50Х или 4ХН.

Наплавку шеек и пустотелых бочек роликов рольгангов из углеродистой стали типов 35, 40 и 50 осуществляют без предварительного нагрева и последующей термообработки. В этом случае используют электродную проволоку типов Св-08, Св-08А, 30ХГСА диаметром 3–4 мм.

Стандартные ролики, изготовленные из легированных сталей 45ХН, 40Х, 50Х и им подобных, наплавляют с предварительным нагревом в печи или газовым пламенем до 300°С. В процессе наплавки температура ролика не должна падать ниже 250°С. Режим наплавки следующий: сварочный ток – 300–400 А; напряжение – 28–32 В; скорость наплавки – 25–30 м/ч; скорость подачи электродной проволоки – 83 м/ч.

Для наплавки применяют флюс АН-348А. Наплавленные ролики подвергают механической обработке на токарном станке.

7.1.18. Наплавка роликов листопрямильных машин

Листопрямильные ролики – основной рабочий инструмент машины. Кованые рабочие ролики из стали 55Х изготавливают пустотелыми. Для цельных опорных роликов также применяют сталь 55Х.

Рабочие ролики наплавляют порошковой проволокой ПП-3Х2В8 диаметром 3,6 мм под флюсом АН-20. Режим наплавки следующий: сварочный ток – 300 А; напряжение – 30 В; скорость наплавки – 25 м/ч; скорость подачи электродной проволоки – 43 м/ч.

Наплавленные ролики обрабатывают абразивом на круглошлифовальном станке. Твёрдость наплавленного слоя получают НВ 450–500.

Опорные ролики наплавляют электродной проволокой 30ХГСА диаметром 3–3,5 мм под флюсом АН-348А и обрабатывают на токарном станке. Твёрдость наплавленного металла получают НВ 230–240. Наплавку ведут без предварительного нагрева.

7.1.19. Наплавка ножей ножниц блюминга

В процессе работы режущая кромка ножа притупляется. Максимальный радиус притупления достигает 20 мм, после чего нож заменяют.

Материал ножа должен характеризоваться высокими режущими свойствами, т.е. сохранять высокую твёрдость и высокую прочность при значительных температурах (до 1100–1200°С), также высокую термическую выносливость. Эти свойства в определённой степени присущи сталям 37ХН3А, 6ХВ2С, 5ХНТ после закалки и соответствующего отпуска.

Наиболее эффективным методом повышения стойкости ножей является автоматическая наплавка под флюсом режущих кромок металла, что позволяет заменить дорогостоящую дефицитную труднообрабатываемую высоколегированную сталь обычной углеродистой сталью. Наплавляемые ножи изготавливают из ковanej стали 45.

Для наплавки ножей ножниц блюминга применяют порошковую проволоку ПП-3Х2В8 диаметром 3,6 мм и флюс АН-20 (стекловидный).

Послековки и соответствующей термической обработки заготовку ножа обрабатывают на металлорежущем станке. У ножа, подготовленного под наплавку, делают четыре фаски шириной 36 мм и глубиной 6 мм с переходной фаской 45°, расположенные на режущих кромках. Перед наплавкой нож подвергают предварительному нагреву до 400°С. После наплавки нож подвергают отпуску при температуре 400°С, а затем охлаждают в ящике с песком под флюсом. Механическую обработку наплавленных режущих кромок осуществляют на горизонтально-фрезерном станке.

7.2. Плазменное напыление

Напыляемые керамические покрытия обладают высокой теплостойкостью, стойкостью к газоабразивному воздействию и действию кислот, щелочей и расплавленных металлов. Для напыления используют силикат циркония, рутиловый концентрат, дунит.

Значительный эффект получается от применения плазменного напыления керамическими материалами для повышения стойкости роликов протяжной печи агрегата цинкования, роликов нормализационных печей, элементов оборудования для обжига эмалированной посуды, мульд разливочных машин, кокилей, тиглей ванн борирования, колец и дисков клапанов горячего воздуха, элементов ванн цинкования, фурм доменных печей и др.

7.2.1. Напыление калибров

На поверхности цилиндрических, кольцевых, резьбовых и других калибров наносят покрытие плазменным или детонационным способом карбидом вольфрама с последующей чистовой обработкой. По сравнению с калибрами, изготовленными целиком из карбида вольфрама, напылённые изделия значительно легче и менее хрупкие. Калибры подвергают также напылению самофлюсующимися хромоникелевыми сплавами с добавлением карбида вольфрама (50%). После напыления такие покрытия подвергают оплавлению при температуре $\sim 1000^\circ\text{C}$.

На рис. 7.2 показана сравнительная износостойкость калибров-пробок, изготовленных различными способами. Как видно, калибры, упрочнённые напылением, имеют наибольшую износостойкость.

7.2.2. Напыление матриц для горячего прессования тугоплавких металлов

Прессование через матрицу молибдена, ниобия, вольфрама и их сплавов – сравнительно новый метод обработки, основной проблемой которого является стойкость матриц. Матрица из инструментальной стали без покрытия за одно прессование при температуре 1320°C изнашивается до такой степени, что её уже невозможно починить.

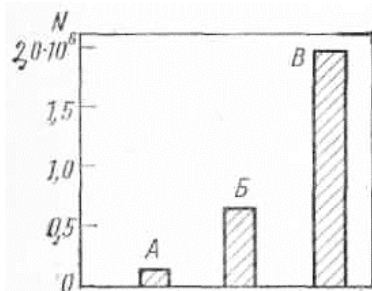


Рис. 7.2. Износостойкость (число циклов N до износа на $2,5 \text{ мкм}$) калибров-пробок, изготовленных тремя способами:

А – закалённые калибры из быстрорежущей стали;

Б – калибры, изготовленные из карбида вольфрама методом порошковой металлургии;

Б – калибры, упрочнённые напылением

При прессовании на участке контакта изделия с матрицей при высоких температурах и давлении на поверхности изделия образуется слой материала (сплав между металлом изделия и матрицы), отличающийся от остального металла изделия по составу и свойствам.

Кроме того, в процессе прессования происходит непрерывное повреждение матрицы, в результате чего значительно изменяются диаметр и форма поперечного сечения прессуемого изделия по длине.

Конические матрицы (90°) из штамповой стали твёрдостью HRC 40–44 упрочняют путём напыления на их поверхность оксида алюминия или диоксида циркония с образованием покрытия толщиной 0,5–1,0 мм. Матрицы с покрытием из оксида алюминия показывают хорошие результаты при температуре до 1650°C, но при температуре выше 1760°C они интенсивно изнашиваются и быстро выходят из строя. Матрицы с покрытием из диоксида циркония успешно работают при температуре до 2370°C. Применение керамических покрытий требует снижения давления прессования. В настоящее время используют матрицы с покрытием из диоксида циркония. Срок их службы в 5–10 раз превышает срок службы аналогичного инструмента без покрытия.

Перед напылением поверхность матриц обрабатывают для придания ей шероховатости, в частности путём нарезания концентрических канавок глубиной 0,25–0,38 мм с шагом ~1 мм.

Для восстановления повреждённых из-за износа матриц применяют как газопламенный, так и плазменный методы нанесения керамических покрытий.

7.2.3. Напыление пуансонов и направляющих роликов

Для изготовления пуансонов, причина быстрого износа которых связана со схватыванием обрабатываемого металла изделия с поверхностью пуансона, применяют различные способы упрочнения и материалы, в частности, напыление молибденом. Это даёт увеличение срока службы пуансонов до 30000–40000 штамповок.

На коническую поверхность направляющих роликов, используемых в прокатном оборудовании для переворачивания стальных слябов, напыляют самофлюсующийся никелевый сплав колмоной № 6 толщиной ~1 мм. После напыления покрытие оплавляют.

Покрытия из никелевых самофлюсующихся сплавов наносят также на тяговые шайбы волочильных машин и фланцы транспортных роликов. Оплавление покрытия на этих изделиях осуществляют путём равномерного их нагрева в печах.

8. УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ (ППД). ФОРМИРОВАНИЕ УПРОЧНЁННОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ППД. ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И СВЯЗ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ С ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЕТАЛЕЙ

8.1. Формирование упрочнённого слоя деталей методом ППД

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) является эффективным средством повышения усталостной прочности, улучшения качества поверхности и износостойкости деталей различной формы и размеров.

Различают механические, пневматические, гидравлические и электромагнитные устройства для ППД.

Большинство деталей машин подвержено изгибу и кручению, при которых напряжения растут в направлении к поверхности. На поверхности расположены основные источники концентрации напряжений и разрушение деталей, как правило, начинается с поверхности. Поэтому особенно важно повышать прочность именно поверхностных и приповерхностных слоёв. Эффект поверхностного упрочнения складывается из собственно упрочнения поверхностного слоя и создания в нём остаточных сжимающих напряжений.

На рис. 8.1 показаны схемы основных видов упрочнения ППД.

Упрочнение роликом и шариком (рис. 8.1, а, б) осуществляется свободно вращающимся роликом или шариком, приводимым в соприкосновение с обрабатываемой поверхностью детали под давлением. В результате пластической деформации происходит наклёп поверхностного слоя, возникают остаточные напряжения сжатия, изменяется структура и увеличивается твёрдость. Происходит также смятие выступов на поверхности от предшествующей механической обработки и заполнение впадин, что повышает чистоту поверхности и уменьшает диаметр детали на величину смятия выступов. Обкатка цилиндрических поверхностей обычно выполняется на токарных и револьверных станках, а плоских – на строгальных.

Наклёп механической чеканкой (рис. 8.1, в, г) осуществляют с помощью механического, пневматического и электромеханического приспособлений путём нанесения ударов по упрочивающей поверхности ударниками различной формы. В результате изменяется качество поверхно-

сти, создаются остаточные напряжения сжатия, повышаются твёрдость на 30–50% и несущая способность деталей.

Центробежно-шариковый наклёп (рис. 8.1, д) основан на использовании центробежной силы стальных шариков диаметром 7–12 мм, свободно перемещающихся в гнездах специального приспособления, вращающегося со скоростью 20–40 м/с над обрабатываемой поверхностью. Встречая на своём пути поверхность детали, движущейся навстречу шарикам со скоростью 30–90 м/мин, каждый шарик с силой ударяет о поверхность, производя наклёп и сглаживание поверхности. В качестве оборудования применяют токарные, шлифовальные и другие станки.

Раскатывание отверстий роликами (рис. 8.1, е) заключается в проталкивании калибрующего инструмента с некоторым натягом через предварительно обработанное резанием или раскаткой отверстие.

Раскатывание отверстий (развальцовку) обычно проводят на токарных, револьверных или сверлильных станках. Рабочее движение сообщают детали или раскатке. В процессе работы происходит вращение раскатки или детали и их относительное перемещение вдоль оси детали.

Дорнование (рис. 8.1, ж) осуществляется за счёт очень большого пластического деформирования поверхностного слоя отверстия детали. При этом изменяются шероховатость и физико-механические свойства материала, обеспечивается устойчивое получение высокой точности и чистоты поверхности. В металле создаётся сложное напряжённое состояние под влиянием нормального давления и силы трения: два напряжения сжатия и одно напряжение растяжения. При дорновании инструмент продавливается или протягивается через отверстие.

Дробеструйный наклёп (рис. 8.1, з, и) осуществляют потоком дроби на пневматических или механических дробемётах для упрочнения деталей сложной формы любой твёрдости.

Дробь загружают в бункер, а обрабатываемую деталь устанавливают в рабочей камере на оправке специального приспособления. Деталь приводят во вращение от электродвигателя, связанного с оправкой через редуктор. Деталь в осевом направлении перемещают вручную или с помощью специального приспособления. Из бункера дробь поступает в форсунку и сжатым воздухом (под давлением 0,5–0,6 МПа) подаётся на деталь. Затем отработанная дробь поступает в сепаратор, где отделяются пыль и мелкие осколки, а годная к дальнейшему использованию дробь подаётся элеватором снова в приёмный бункер.

В механических (роторных) дробемётных устройствах ротор закрепляется на валу и приводится в движение электродвигателем. Дробь, за-

гружаемая внутрь, центробежной силой вращающегося ротора выбрасывается на обрабатываемую деталь. Для вращения и подачи детали во время обработки установка снабжена специальным приспособлением. После наклёпа дробь скатывается к приёмной части элеватора и вновь поступает в загрузочный бункер. Осколки и пыль удаляются вытяжным вентилятором или сепаратором.

Алмазное выглаживание (рис. 8.1, к). При алмазном выглаживании деформирующим инструментом является кристалл алмаза, находящийся в специальной оправке. Выглаживатель монтируется в специальном приспособлении, установленном в резцедержателе токарного станка. Давление при выглаживании создаётся тарированной пружиной или давлением сжатой жидкости. При вращении детали продольную подачу имеет инструмент.

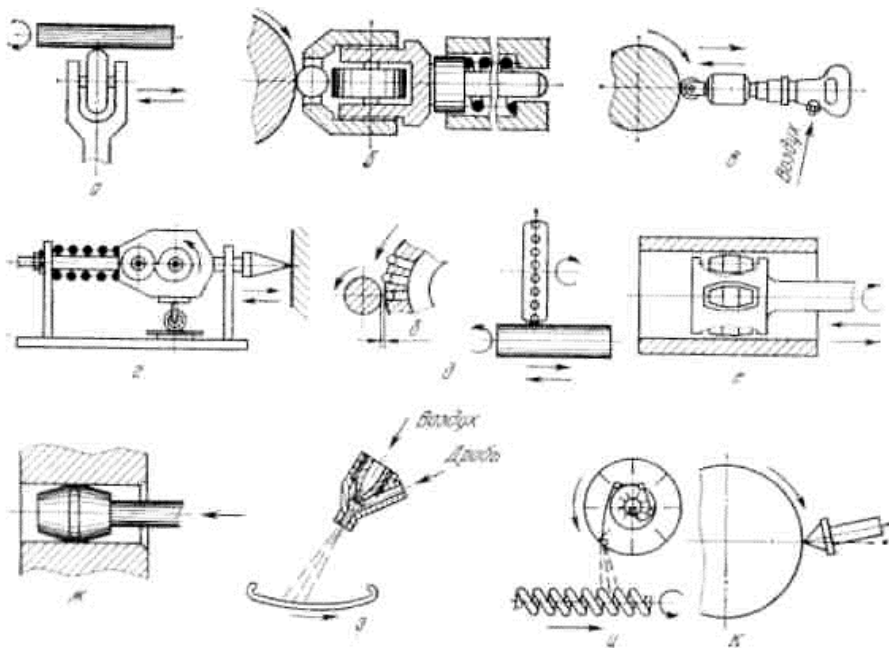


Рис. 8.1. Принципиальные схемы основных видов упрочнения поверхностным пластическим деформированием

В табл. 8.1 показаны основные области использования различных методов ППД.

Области использования некоторых методов
поверхностного пластического деформирования

Метод ППД	Область применения
Обкатка роликами или шариками	Для обработки деталей типа осей, валков и других, имеющих форму тел вращения, впадин резьбовых деталей, шестерён, шлицевых пазов и др. Роликами обрабатываются плоские поверхности
Чеканка ударным инструментом и обработка вибрирующим роликом	Для обработки крупных деталей, где требуется получить значительную глубину наклёпа
Ротационное упрочнение	Для упрочнения деталей малой жёсткости или для обработки внутренней поверхности
Дробеструйный наклёп	Для обработки небольших деталей сложной формы (витых пружин, рессор, шестерён и др.)

8.1.1. Обкатка роликами и шариками

Обкатка роликами и шариками – простой и наиболее распространённый метод ППД, особенно для тел вращения. Обкатка повышает предел выносливости валов на гладких участках на 20–40%, в подступичных частях – на 80–100%, в галтелях – на 60–100%, сварных валов – в два раза, мест резких концентраторов и резьбы – в 2–3 раза.

Процесс обкатки происходит в условиях трения качения с проскальзыванием. Рекомендуется его проводить с применением смазочно-охлаждающей жидкости.

Малые подачи обеспечивают лучший результат. Наиболее эффективны первые три прохода. Увеличение числа проходов может привести к перенаклёпу и увеличению шероховатости поверхности, а иногда и к снижению выносливости. Скорость обкатки практически не влияет на шероховатость. Усилие на ролик не должно создавать напряжения, превышающего предел прочности, т.е. не должно вызывать разрушения кристаллов в процессе деформации металла.

При упрочняющей обкатке режим обкатки считается правильным, если повышение твёрдости составляет 24–40% и глубина наклёпа составляет 0,02–0,04 диаметра детали.

В табл. 8.2 представлены некоторые данные по упрочнению крупных деталей металлургического оборудования.

Таблица 8.2

Способы и эффективность упрочнения некоторых деталей металлургического оборудования

Наименование деталей, материал	Поверхность упрочнения	Способ упрочнения	Эффект упрочнения
Валы конусных дробилок крупного дробления; сталь 40, 34ХН1М	Подступичные части $d = 400\text{--}600$ мм	Накатывание роликом, $P = 7$ кН	Повышение предела выносливости при изгибе на 50–80%
Станинные ролики прокатных станов, валы редукторов поворота и др.; сталь 40, 40Х, 34ХН1М	Галтели $R = 8\text{--}20$ мм	Накатывание роликом с биением рабочего профиля, $P = 5\text{--}25$ кН	То же, на 30–50%
Цилиндрические зубчатые колёса экскаваторов, конические шестерни дробилок; сталь 34ХН1М	Переходной профиль у корня зубьев с модулем $m = 26\text{--}30$ мм	Накатывание на специальных полуавтоматических станках	Увеличение долговечности в 2–10 раз
Станины рабочих клетей обжимных станов; сталь 35Л	Конические (1:6) отверстия ($d = 640$ мм) под установку станинных роликов	Раскатывание, $P = 70$ кН	Уменьшение смятия кромки на 25–40%
Станины шестерённых клетей прокатных станов; сталь 35Л	Отверстия под подшипники шестерённых валков $d = 1250$ мм	То же, $P = 40$ кН	Предотвращение проворачивания наружных колец подшипников
Станины, корпуса чаш и колец конусных дробилок; сталь 35Л	Цилиндрические, плоские и конические поверхности $d = 1300\text{--}3800$ мм	То же, $P = 30$ кН	То же, на 15–25%

Наименование деталей, материал	Поверхность упрочнения	Способ упрочнения	Эффект упрочнения
Корпуса и гильзы гидро- и пневмоцилиндров различного назначения; сталь 10, 40	Зеркало цилиндров $d = 25-320$ мм	Раскатывание жёсткими планетарными раскатками с натягом 0,1–0,25 мм	Уменьшение износа мягких уплотнений поршней в 8–10 раз
	То же, $d = 340-600$ мм	Раскатывание инструментами пониженной жёсткости, $P = 5-30$ кН	
Штанги прессов; сталь 50, 1Х18Н10Г (наплавка)	$d = 600-1000$ мм, $l = 400-5800$ мм	Накатывание бочкообразными роликами, $P = 30-60$ кН	Уменьшение износа бронзовых вкладышей втулок и букс в 3 раза. Сокращение времени приработки в 20 раз
Валы и корпуса конусов дробилок; сталь 34ХН1М, 35Л	Конические (1:12) хвостовики $d = 480$ мм, сферы $r = 1100$ мм	Накатывание роликами на токарном и карусельном станках	Уменьшение износа
Нажимные винты прокатных станов; сталь 34ХН1М	Плоскости квадратного хвостовика 300x300x2380 мм	Накатывание на фрезерном станке	

Малое давление снижает эффект обкатки, повышенное – вызывает разрушение структуры металла с последующим отслаиванием.

С целью получения нужной структуры применяют термическую или химическую обработку с последующим пластическим деформированием. Детали, работающие в тяжёлых условиях трения, следует упрочнять при усилиях, не превышающих 750–1000 Н.

Термический отпуск дополнительно повышает предел выносливости на 5–10% и условный предел коррозионной усталости на 20%, что объясняется старением наклёпанного слоя, т.е. увеличением прочности поверхностного слоя.

Дополнительная термическая обработка, заключающаяся в старении наклёпанного слоя при 200–400°C, является благоприятной в отношении повышения усталости и коррозионной усталости сталей.

Износостойкость деталей, работающих при трении, определяется структурой их поверхностного слоя. Наибольшей износостойкостью обладает та сталь, которая состоит из мелкоигольчатого мартенсита с незначительным количеством остаточного аустенита и мелких раздробленных карбидов.

8.1.2. Зона деформирования при ППД

Поверхностный слой детали, упрочнённой обкаткой роликом, находится в напряжённом состоянии вследствие возникновения внутренних напряжений в результате того, что не во всём объёме металла происходит одна и та же деформация. В наружных слоях происходит пластическая деформация, а во внутренних – упругая деформация. Упругодеформированная зона металла стремится вернуть своё прежнее состояние, однако этому препятствует наружный пластически деформированный слой. В результате взаимодействия этих слоёв возникают значительные внутренние напряжения сжатия и растяжения.

Разрушение детали может начинаться с верхнего слоя или быть подслоинным. В последнем случае основную роль будут играть глубина наклёпанного слоя и распределение остаточных напряжений в зоне перехода от слоя к неупрочнённой сердцевине. Эффект упрочнения растёт с увеличением глубины слоя, а также глубины проникновения остаточных сжимающих напряжений под поверхность. При дальнейшем увеличении глубины упрочнённого слоя, не сопровождающемся увеличением твёрдости поверхности, разрушение из подслоинного может перейти на поверхность. В этом случае дальнейшее увеличение глубины слоя не будет приводить к повышению эффекта упрочнения, и основную роль будут играть твёрдость и величина остаточных напряжений на поверхности.

При установлении режимов упрочнения деталей ППД за критерий предельной степени деформации часто принимают параметры отпечатка, полученного в результате статического внедрения деформирующего

элемента в поверхность детали. При этом исходят из условия физического подобия между процессами статического вдавливания и упрочнения ППД, отличающегося наличием относительного тангенциального перемещения контактирующих поверхностей. Между тем в этих условиях основным показателем достижения предельной степени деформации является не общий уровень внедрения деформирующего элемента в обрабатываемую поверхность, а соотношение параметров h_s/h (рис. 8.2), где h_s – высота осевой волны, h – глубина внедрения деформирующего элемента относительно исходной поверхности детали. Именно эти параметры определяют интенсивность и характер перераспределения по глубине упругопластических и упругих сдвиговых деформаций в поверхностном слое, являющихся основными факторами, с которыми связан процесс формирования остаточных макронапряжений.

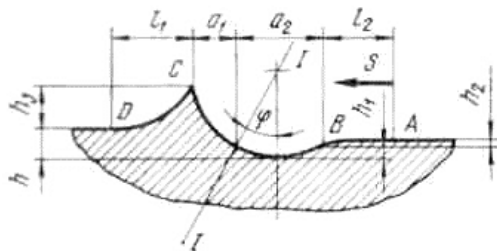


Рис. 8.2. Схема области деформации в процессе накатывания

Как видно из типичной формы пластической деформации, в осевом сечении для установившегося периода накатывания (см. рис. 8.2), помимо контактной зоны ($a_1 + a_2$), пластическая деформация распространяется на внеконтактные поверхности (l_1 , l_2), примыкающие к контактным поверхностям. Первая зона разделена нейтральной плоскостью $I - I$, наклонённой под углом φ к поверхностной оси инструмента, на участке a_1 и a_2 . При переходе деформируемого сечения от одного участка к другому изменяется направление течения материала поверхностного слоя. Слева от сечения $I - I$ он смещается в направлении движения подачи S (первичная деформация), а справа – противоположно этому направлению (вторичная деформация).

В результате вытеснения и сдвига материала из зоны a_1 формируется волна высотой h_s и передняя внеконтактная зона деформации l_1 , приподнимающаяся за счёт выпучивания относительно исходной поверхности A . В противоположность этому вторичные зоны деформации (a_2 , l_2) первоначально опущены относительно обработанной поверхности D на h_1 и h_2 соответственно. При вторичном сдвиге и выпучивании материала поверхностного слоя последние зоны приподнимаются, что приводит к постепенному выравниванию до уровня обработанной поверхности. Таким

образом, за период прохождения от точки D до точки A каждая частица материала испытывает разнородную и многократную деформацию в связи с тем, что значение S , как правило, более чем на порядок меньше общей длины области деформации. При этом за каждый оборот в область деформации вовлекается новый участок и заканчивается формообразование очередного участка обработанной поверхности.

По мере увеличения усилия упрочнения P высота h_s волны увеличивается быстрее, чем глубина h внедрения. Обусловлено это ростом уровня сдвиговой деформации и интенсификацией накопления материала в зоне волны. При увеличении соотношения h_s/h дополнительные затраты работы концентрируются в основном на деформации материала, сосредоточенного в зоне волны. Это, с одной стороны, приводит к снижению интенсивности и темпа прироста глубины распространения упругопластических деформаций, а с другой может вызвать чрезмерную интенсификацию вторичных деформаций и неблагоприятное перераспределение остаточных макронапряжений с соответствующим снижением эффективности упрочнения деталей машин.

В общем виде отношение h_s/h характеризует накопленную величину обжатия деформируемого материала в зоне контакта и соотношение площадей зон волны h_s и углубления h , показывающего уровень избыточного материала в составе волны. Условия сдвига избыточного материала в сочетании со степенью его деформации определяют качественные показатели поверхностного слоя.

На значение отношения h_s/h оказывают содействие многочисленные факторы процесса упрочнения, которые можно объединить в три группы. Первая из них включает режимные параметры процесса упрочнения: усилие P , взаимосвязанное с размерами, формой и положением оси деформирующего элемента относительно обрабатываемой поверхности, а также подачу, скорость обработки и др. Вторая группа отражает влияние на параметры области деформации свойств материала детали и инструмента: исходные физико-механические и адгезионные свойства, их изменение в период обработки. Третья группа включает факторы, определяющие условия трения в зоне локального контакта: кинематические условия взаимодействия контактирующих тел, исходное и преобразованное в период обработки состояние контактирующих поверхностей.

8.2. Остаточные напряжения и связь состояния поверхности с эксплуатационными свойствами деталей

Особую положительную роль играют остаточные сжимающие напряжения, возникающие при ППД. Остаточные напряжения не релаксируют в стальных деталях десятки лет при нормальной температуре. Снятие остаточных напряжений, возникающих при циклическом нагружении, происходит только при высоких температурах. Большим достоин-

ством ППД является отсутствие ослаблений в местах обрыва упрочнённого слоя металла, имеющееся при поверхностной закалке.

Установлено весьма важное положение в отношении радиусов галтельных переходов: отпадает потребность делать большие радиусы, если применять упрочняющую обработку, которая снимает эффект концентрации. Это позволяет использовать всю длину шейки вала как опорную поверхность подшипника без уменьшения его несущей способности. При этом можно выполнять галтели очень малых радиусов ($r : D = 0,01-0,03$). Упрочнение галтелей малых радиусов рационально использовать как при изготовлении новых, так и при ремонте эксплуатируемых деталей.

Поверхностное пластическое деформирование вызывает не только замедление роста трещин, но при определённых условиях приводит к полной остановке их распространения при неизменных режимах нагружения.

ППД можно применять для широкой номенклатуры деталей, в том числе работающих при низких и высоких температурах, ударных циклических нагрузках, малоцикловом нагружении и т. д.

Наклёпанный слой материала чувствителен к нагреву. Повышение температуры до $150-200^{\circ}\text{C}$ мало снижает напряжения сжатия, созданные наклёпом, но при более высоких температурах остаточные напряжения уменьшаются. Нагрев до $400-500^{\circ}\text{C}$, а в некоторых случаях только до 800°C , может полностью ликвидировать действие наклёпа вследствие наступающей при этих процессах рекристаллизации, устраняющей кристаллоструктурные изменения, вызванные наклёпом.

Методы ППД весьма эффективны для повышения сопротивления коррозионной усталости, так как они оказывают высокое сопротивление развитию электрохимической неоднородности. Особенно эффективным является предварительное упрочнение ППД с последующей защитой упрочнённого слоя различными покрытиями. В этом случае наклепанный слой не подвергается коррозии и детали способны длительное время выдерживать циклические нагрузки.

Применение ППД для устранения дефектов от предшествующей технологической обработки весьма эффективно. Например, предел выносливости пружинной стали в результате обезуглероживания может уменьшаться примерно на 60%. Для устранения этого дефекта поверхности применяют виброшлифование или виброупрочнение, которое полностью устраняет влияние обезуглероживания на усталостные характеристики.

В трубных сварных соединениях с кольцевыми швами предел выносливости может быть ниже на 30–40% относительно основного металла. Применение упрочнения стальными шариками (диаметром 1,5–3,5 мм) существенно повышает предел выносливости шва.

При нанесении покрытий возникают различные дефекты (поры, микро- и макротрещины, включения), которые приводят к существенному снижению усталостной прочности деталей. ППД металлопокрытий вос-

становливают сопротивление деталей усталости частично или полностью, а иногда обеспечивает его выше исходного уровня.

При помощи ППД можно устранять литейные дефекты деталей (раковины, поры), погрешности геометрической формы деталей, полученные на предшествующих технологических операциях, уменьшать шероховатость поверхностей.

8.2.1. Влияние обкатки на износ деталей

Износ упрочнённых поверхностей существенно зависит от давления, скорости скольжения и наличия смазки. Увеличение силы обкатывания при сухом трении сопряжённых деталей приводит к снижению износостойкости. В случае применения смазки износостойкость существенно повышается (при условии отсутствия перенаклёпа).

Износостойкость деталей, работающих на трение, определяется структурой их поверхностного слоя. Наибольшей износостойкостью обладает та структура, которая состоит из мелкоигольчатого мартенсита с незначительным количеством остаточного аустенита и мелких раздробленных карбидов. Для получения такой структуры часто применяют термическую или химико-термическую обработку с последующим механическим поверхностным упрочнением.

В условиях ограниченных нагрузок целесообразнее упрочнять детали при больших усилиях. Детали, работающие в тяжёлых условиях трения, следует упрочнять при усилиях, не превышающих 750–1000 Н.

Например, втулки и пальцы тяговых цепей элеваторов и втулки валов насосов, изготовленные из сталей 20 и 18ХГТ, подвергали химико-термической обработке и последующему механическому упрочнению шариком с усилием прижатия 2 кН. После этого износостойкость деталей, работающих в гидроабразивной среде, повышается в 2–3 раза. Особенно эффективно упрочнение втулок валов насосов, перекачивающих магнетитовую суспензию: срок их службы, определяемый до упрочнения двумя неделями, увеличивается до трёх месяцев.

Долговечность узлов, содержащих подвижный силовой контакт деталей, может быть увеличена как повышением износостойкости материала деталей, так и оптимизацией рельефа контактирующих поверхностей. Применяя различные способы обработки, можно получать поверхности, различающиеся не только высотой, но и формой неровностей.

Установлены следующие закономерности изменения износостойкости накатанных поверхностей:

- при трении скольжения со смазкой накатанные поверхности обладают более высокой износостойкостью по сравнению с обточенными или шлифованными поверхностями;
- в условиях сухого трения слабые степени наклёпа металла (сглаживающее накатывание) приводят к незначительному повышению износостойкости. С увеличением степени наклёпа темп износа возрастает;

– при трении скольжения со смазкой накатанные поверхности менее подвержены схватыванию и задирам, чем обточенные и шлифованные поверхности;

– при абразивном изнашивании накатывание не влияет на износ поверхностей.

Износ поверхности детали, работающей в паре с накатанной, меньше, чем со шлифованной и, тем более, с точёной. Это объясняется следующим:

– накатывание даёт зеркальную гладкую поверхность с более низкой шероховатостью, чем шлифование;

– зёрна шлифующего материала могут при шлифовании закрепляться на поверхности обрабатываемой детали и служить абразивом, влияющим на износ сопряжённой детали;

– накатанные поверхности лучше удерживают масляную плёнку;

– накатанные поверхности быстрее прирабатываются.

8.2.2. Влияние ППД на характеристики усталостной прочности

Основным показателем эффективности применения поверхностного пластического деформирования является уровень повышения усталостной прочности.

Усталостное разрушение деталей, упрочнённых ППД, может начинаться как с поверхности, так и под поверхностью, обычно на глубине до 1–2 мм. В последнем случае деталь проявляет большее сопротивление усталости и повышенную циклическую трещиностойкость. Место очага усталостного разрушения определяется свойствами поверхности и поверхностного слоя материала, а также геометрией детали, уровнем и характером переменного нагружения и некоторыми другими факторами.

Если напряжения от внешней нагрузки на поверхности близки пределу выносливости упрочняемой детали, а под упрочнённым поверхностным слоем они совпадают с пределом выносливости неупрочнённого материала сердцевины детали, усталостное разрушение равновероятно может начинаться как с поверхности детали, так и под поверхностью. В таком случае очаг подповерхностного разрушения будет располагаться в районе границы раздела упрочнённого слоя и неупрочнённой сердцевины детали.

Трещины зарождаются под поверхностью детали только при нагружении её в низкоамплитудной области. С повышением уровня циклических нагрузок очаг трещин перемещается ближе к поверхности и при высоких нагрузках переходит на поверхность детали.

Непосредственным источником зарождения подповерхностных усталостных трещин в высокопрочной стали являются инородные включения, которые снижают предел выносливости в подповерхностной зоне и существенно способствуют рассеянию характеристик сопротивления усталости.

При высоком уровне действующих в деталях напряжений в результате пластической деформации происходит снятие остаточных напряжений, возникающих при упрочнении, и поэтому могут исчезать преимущества, полученные при упрочнении.

Наибольшая степень упрочнения соответствует тем видам деформации, которые связаны с перераспределением углерода (разупрочнение твёрдого раствора, взаимодействие с дислокациями, выделение карбидов). К таким процессам относится деформационное старение, которое обеспечивает большую степень упрочнения, чем деформация равновесных структур, когда отсутствуют процессы, связанные с перераспределением или выделением углерода. Процесс деформационного старения и происходящее по этому типу. Упрочнение при поверхностном наклёпе мартенсита тем эффективнее, чем больше содержание углерода в стали.

Обкатывание роликами, наклёп дробью и термическая обработка существенно повышают предел выносливости высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, особенно при наличии концентраторов напряжений. Этот способ рекомендуется для изготовления наиболее ответственных корпусных литых деталей машин из феррито-перлитного ковкого чугуна с количеством перлита 50–80%. Томлёные отливки подвергают обработке дробью с целью очистки и упрочнения, отверстия отливок на финише механической обработки обкатывают роликом. Обкатка может быть заменена закалкой обработанных отверстий токами высокой частоты.

9. ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ППД (ОБКАТЫВАНИЕ, ВЫГЛАЖИВАНИЕ, УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА, ЧЕКАНКА, УПРОЧНЕНИЕ ПРОВОЛОЧНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ, ОБРАБОТКА ДРОБЬЮ И ДР.)

9.1. Приспособления для обкатки роликами и шариками

В связи с большим разнообразием деталей, подвергающихся поверхностному пластическому деформированию, различными условиями выполнения этого процесса разработано большое число приспособлений.

На рис. 9.1 представлены схемы роликовых накаток.

Однороликовая накатка (рис. 9.1, *а*) имеет цилиндр 1, пружину 2, державку 3. Накатка закрепляется в суппорте токарного станка. В зависимости от назначения накатки меняют профиль рабочей части ролика 4.

Трёхроликовую накатку (рис. 9.1, *б*) устанавливают на специальных направляющих вместо суппорта или рядом с ним. Особенность этой накатки заключается в том, что она имеет возможность самоцентрироваться. Накатка состоит из коромысла 2, роликов 3 и 4, установленных в корпусе 5, пружины 6, динамометра 7 и винта 7, при вращении которо-

го происходит сжатие пружины, а ролик 3, установленный на качающемся коромысле, прижимается к заготовке.

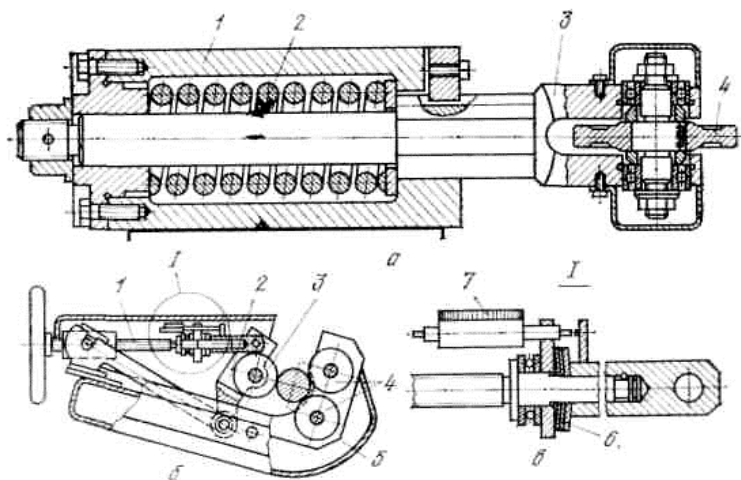


Рис. 9.1. Роликовые накатки

Для обкатки деталей применяют также шариковые накатки, схемы которых представлены на рис. 9.2.

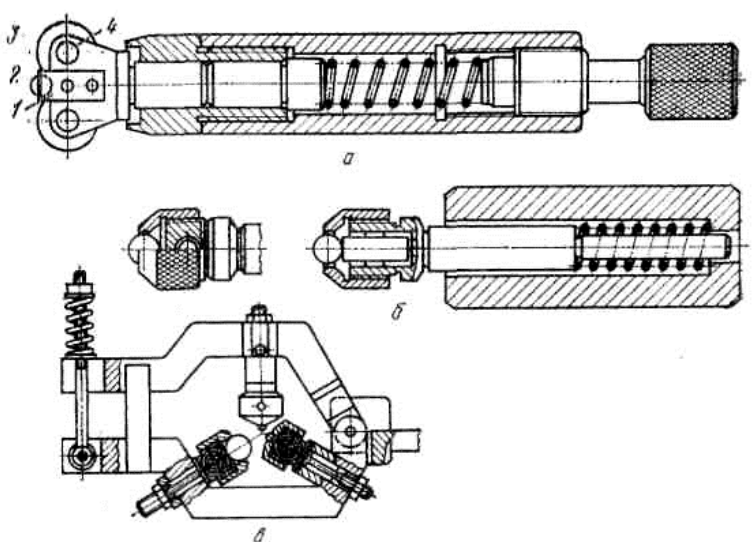


Рис. 9.2. Шариковые накатки:

- а – одношариковая с опорой шарика на два подшипника;
- б – одношариковая с опорой шарика на один подшипник;
- в – трехшариковая

Для предохранения шарика 2 от выпадения его укладывают в бронзовую скобу 1. Шарик упирается на подшипники 3, посаженные на оси 4. Усилие обкатки регулируется пружинами. В качестве оборудования используют токарные, строгальные и специальные станки.

Трёхроликовое приспособление для упрочнения поверхности крупных прямых валов предназначено для валов диаметром 120–200 мм методом вдавливания роликов в обкатываемую поверхность с помощью системы рычагов и тарированных пружин. Детали, установленной в центре станка, при обработке придают вращение, а приспособление с упрочняющими роликами, обхватывающими поверхности, перемещается суппортом вдоль оси станка.

Головка для чистовой раскатки поверхностей цилиндрических отверстий на расточном или токарном станке состоит из корпуса, комплекта роликов со сферической поверхностью, установленных в сепараторе. В собранном виде ролики заводятся в обрабатываемое отверстие. Осевое усилие при раскатывании воспринимается корпусом головки через муфту. Диаметр обрабатываемых отверстий составляет 65–160 мм; припуск на раскатывание – 0,03–0,06 мм; частота вращения при раскатке – 100–120 об/мин; шероховатость – $Ra = 0,16–0,32$ мкм.

Многороликовая раскатка предназначена для чистовой обработки отверстий больших диаметров пневматических цилиндров, стальных корпусов редукторов и аналогичных деталей. Обработку отверстий производят на специальных станках глубокого сверления.

Раскатка состоит из оправки, кольца, роликов, обоймы, опорной и контрфорной гайки и упорного однорядного шарикоподшипника. Работает раскатка в комплекте с борштангой, установленной на станке, и соединена с ней резьбовым соединением. При раскатке обильно подают охлаждающую жидкость. Диаметр обрабатываемых отверстий составляет 80–500 мм; шероховатость поверхности после раскатывания – $Ra = 2,5–0,63$ мкм; масса – до 253 кг.

При прочих равных условиях производительность процесса накатывания определяется допустимой скоростью накатывания и продольной подачей. Скорость ограничивается главным образом конструкцией опор рабочего ролика, а подача пропорциональна длине пластического контакта ролика с деталью.

Располагая усилием накатывания, ограничиваемым характеристикой станка или жёсткостью обрабатываемой детали, стремятся с целью получения вытянутого в направлении подачи пятна контакта применять ролики возможно меньшего диаметра с большим профильным радиусом.

При всём разнообразии конструкций роликовых узлов, связанных с конкретным назначением накатывающих устройств, можно выделить три наиболее распространённые формы: двухопорные, вкладывающиеся и консольные роликовые узлы.

На рис. 9.3 представлены схемы различных роликовых узлов.

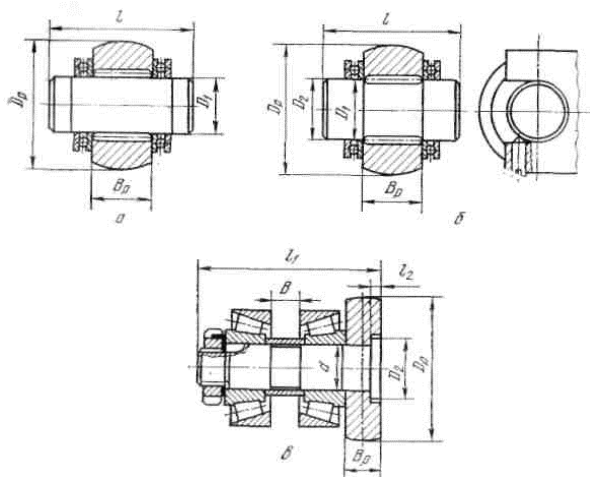


Рис. 9.3. Роликовые узлы

Двухопорный роликовый узел (см. рис. 9.3, а) содержит ролик, установленный на игольчатом радиальном подшипнике и двух упорных шарикоподшипниках на оси, закреплённой по схеме двухопорной балки и выполняющей одновременно роль внутренней опоры игольчатого подшипника. Такая схема обеспечивает высокую компактность конструкции и при правильно выбранных размерах высокую стойкость роликов.

В ряде случаев удобно применять вкладывающиеся роликовые узлы (см. рис. 9.3, б). Дорожка качения игл в этой конструкции углублена в тело оси относительно установочных концов на величину, близкую к половине диаметра иголки. Собранный роликовый узел вкладывают в расточки головки и фиксируют стопорными винтами.

Для накатывания поверхностей, ограниченных уступами, применяют консольные роликовые узлы (см. рис. 9.3, в). Расстояние между подшипниками узла в два раза больше, чем между роликом и ближайшим к нему подшипником, а сила, воспринимаемая этим подшипником, в 1,5 раза больше усилия накатывания. Второй подшипник несёт нагрузку, равную половине усилия накатывания. В связи с этим в роликовом узле можно использовать подшипники разных серий, что позволяет несколько укоротить ось, однако с целью унификации, как правило, применяют одинаковые подшипники.

Для применения накатывающих инструментов с рабочими роликами кругового профиля большое значение имеет постоянство усилия накатывания. Колебания усилия накатывания вызывают изменения угла вдавливания ролика, а это приводит к волнистости накатанной поверхности.

Волнистость удаётся предотвратить при угле вдавливания не более $2^{\circ}30'$. Предотвращение волнистости накатанной поверхности достигается также стабилизацией усилия накатывания. При постоянном усилии накатывания и точно изготовленном ролике процесс деформации металла происходит равномерно и становится допустимым применение увеличенных углов вдавливания. При этом происходит смятие более грубых неровностей поверхности, совмещение чистового и упрочняющего накатывания, производительность процесса ППД повышается.

Постоянство усилия накатывания зависит от жёсткости накатывающего инструмента.

Особое внимание уделяется механизму передачи усилия на ролик. Уменьшение колебаний усилия при накатывании, например, в гидравлических устройствах – реальный путь повышения эффективности ППД.

Известны конструкции шариковых малогабаритных обкатников, в которых, в качестве упругой опоры, используют гидропласт. Замена жёсткой металлической опоры гидропластом позволяет уменьшить трение шара об опору (при работе со смазкой образуется неразрываемая масляная плёнка) и значительно увеличить скорость обкатывания (до 1000 м/мин и более). Шар обкатника может поддерживаться жидкостью или пластической смазкой, как показано на рис. 9.4.

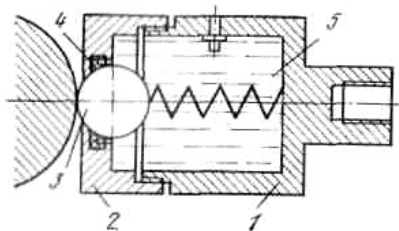


Рис. 9.4. Одношариковый обкатник

Опорой одношарикового обкатника служит масло, находящееся под избыточным давлением. Корпус 1 обкатника имеет с одной стороны хвостовик, закрепляемый в резцедержателе станка. С другой стороны корпуса крепится крышка 2, снабжённая центральным отверстием, в котором установлен подпружиненный деформирующий шарик 3 с манжетным уплотнением 4. Пружина служит только для удобства монтажа шара и в дальнейшей работе не участвует. Внутри корпуса выполнена камера 5, в которую залито масло. Давление на шар можно создать несколькими способами: наворачивая крышку 2 на корпус, тем самым уменьшая объём внутри камеры, или подсоединяя через штуцер масляный насос. При создании избыточного давления масла внутри камеры шар плотно прижимается к крышке корпуса и препятствует вытеканию масла. В процессе работы за счёт давления шара в поверхность детали образуется зазор

между шаром и отверстием крышки и шар с минимальным моментом трения производит обкатывание. В этом случае вытеканию масла препятствует манжетное уплотнение.

9.2. Алмазные выглаживатели

Алмазное выглаживание заключается в обработке предварительно шлифованной полированной поверхности алмазным инструментом без снятия стружки. Скорость вращения детали находится в пределах 50–400 м/мин; подача – 0,02–0,1 мм/об; радиальное усилие на резце – 50–300 Н.

Процесс применим как для пластичных материалов, так и для термообработанных до высокой твёрдости (закалка токами высокой частоты, азотирование), почти всех марок конструкционной, высокопрочной и нержавеющей стали, за исключением титановой.

При выглаживании поверхностный слой уплотняется на глубину 0,3–0,5 мм с увеличением микротвёрдости на 15–65%; в нём возникают высокие остаточные напряжения сжатия (до 1–2,5 Н/мм²), что обеспечивает значительное повышение усталостной прочности. Шероховатость поверхности уменьшается. Микрорельеф приобретает благоприятные для циклической прочности плавные очертания. Процесс выглаживания требует тщательной обработки при его применении.

Инструмент, установленный в специальную пружинную оправку, применим для обработки наружных и внутренних поверхностей. Необходимое давление алмаза на обрабатываемую поверхность обеспечивается тарированной пружиной.

В качестве смазывающей охлаждаемой жидкости (СОЖ) применяют чистое минеральное масло или смазку В-32.

Закрепляется алмаз чаще всего пайкой при помощи серебряного припоя, имеющего сравнительно низкую температуру плавления (600–650°С). Схематично универсальный выглаживатель представлен на рис. 9.5.

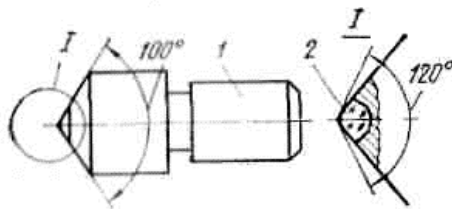


Рис. 9.5. Универсальный алмазный выглаживатель

Выглаживатель состоит из оправки 1 и алмаза 2. Он монтируется в специальном приспособлении, устанавливаемом в резцедержателе токарного станка.

В практике применяются выглаживатели с радиусом сферы алмаза 0,5–3,5 мм. Прочность и твёрдость алмаза в различных направлениях

ввиду его анизотропии неодинакова, вследствие чего большое значение имеет правильная кристаллографическая ориентация алмаза. Его следует ориентировать так, чтобы в процессе выглаживания истирание происходило в «твёрдом» направлении, т.е. ориентировать «твёрдое» направление в направлении вектора скорости.

Для изготовления алмазного инструмента чаще всего используются кристаллы массой 0,4–0,9 карат. Применение для выглаживателей синтетических алмазов целесообразно при обработке более мягких сталей и цветных металлов.

При выглаживании закалённой стали ШХ15, когда контактная температура не превышает 500–600°С, стойкость сферического выглаживателя составляет 100–150 км пути.

Рекомендуются следующие радиусы рабочей части алмаза: 0,5–1,5 мм – образцов из закалённых сталей высокой твёрдости (HRC 58–64); 1,5–2,5 мм – для образцов закалённых сталей высокой твёрдости (HRC 40–58); 2,0–3,0 мм – для образцов незакалённых сталей средней твёрдости; 2,5–3,5 мм – для цветных металлов и сплавов.

9.3. Отделочно-упрочняющая обработка

Среди технологических методов, обеспечивающих повышение прочности, жёсткости и качества деталей машин, большую эффективность имеет отделочно-упрочняющая обработка (ОУО), осуществляемая ППД. ОУО – завершающая операция технологического цикла изготовления деталей, в большинстве случаев успешно заменяющая традиционные способы финишной обработки, такие, как доводка, хонингование, суперфиниширование и др.

Наиболее простые и перспективные методы ОУО ответственных деталей следующие: обкатывание шарами; алмазное выглаживание; ультразвуковое упрочнение – УЗУ (обкатывание с наложением ультразвуковых колебаний); упрочнение вращающимися механическими щётками.

В табл. 9.1 представлены оценки эффективности различных методов ОУО сталей.

Таблица 9.1

Эффективность различных методов ОУО сталей

Метод обработки	Прирост твёрдости ΔHV , %	Толщина наклёпанного слоя, мм	Остаточные напряжения σ_r , Н/мм ²
Обкатывание шаром	8–15	0,3–0,8	400–750
Алмазное выглаживание	8–20	0,1–0,8	500–850
Ультразвуковое упрочнение (УЗУ)	9–22	0,1–0,25	300–600
Обработка щётками	8–20	0,04–0,08	600–1100

Обкатывание шаром и УЗУ уменьшает шероховатость поверхностей с $R_a = 0,35-1,2$ до $0,2-0,32$ мкм, алмазное выглаживание – до $R_a = 0,09-0,15$ мкм. Уменьшение шероховатости поверхности, сопровождаемое увеличением радиусов закругления вершин и впадин неровностей, во всех случаях значительно увеличивает опорную длину профиля, что благоприятно влияет на контактную жёсткость и другие эксплуатационные характеристики деталей.

Изменение физико-механических свойств поверхностного слоя и, в частности, повышение твёрдости и предела текучести, создание более однородной структуры и субструктуры наиболее деформированного верхнего слоя в сочетании с остаточными сжимающими напряжениями и увеличением опорной поверхности, повышает его контактную жёсткость, прочность и износостойкость. В результате возрастает сопротивление деформациям в процессе работы деталей машин, что замедляет образование усталостных трещин и отдаляет время отрыва частиц при трении скольжения и время разрушения деталей или наступления поверхностного выкрашивания при трении качения.

УЗУ целесообразно применять для получения более интенсивного, но менее глубокого упрочнённого слоя при обработке маложёстких деталей.

9.4. Чеканка

Сущность метода упрочнения чеканкой заключается в том, что с помощью специального приспособления (электромеханического, механического или пневматического типа) наносят удар по упрочняемой поверхности.

В результате удара инструмента (ударника с бойками) изменяется качество поверхности и в поверхностном слое создают остаточные напряжения сжатия. Шероховатость поверхности обычно находится в пределах $R_a = 10-40$ мкм. Глубина наклёпа при чеканке достигает 35 мм. Твёрдость поверхности, обработанной чеканкой, на 30–50% выше твёрдости исходной заготовки.

Для достижения меньшей шероховатости поверхности после чеканки следует предусмотреть механическую обработку на глубину до 0,5 мм. Частота колебаний инструмента и частота вращения детали (перемещения пластин) должны быть согласованы так, чтобы наклёпанные участки перекрывали друг друга. При ультразвуковой чеканке боёк прижимают к детали силой 100–200 Н, он колеблется с частотой 20–25 кГц и с амплитудой 10–20 мкм.

9.4.1. Чеканочные устройства

Чеканочный молоток с вибрирующим роликом пневматического действия, показанный на рис. 9.6, изготавливают на базе стандартных пневматических молотков и закрепляют в резцедержателе токарного станка.

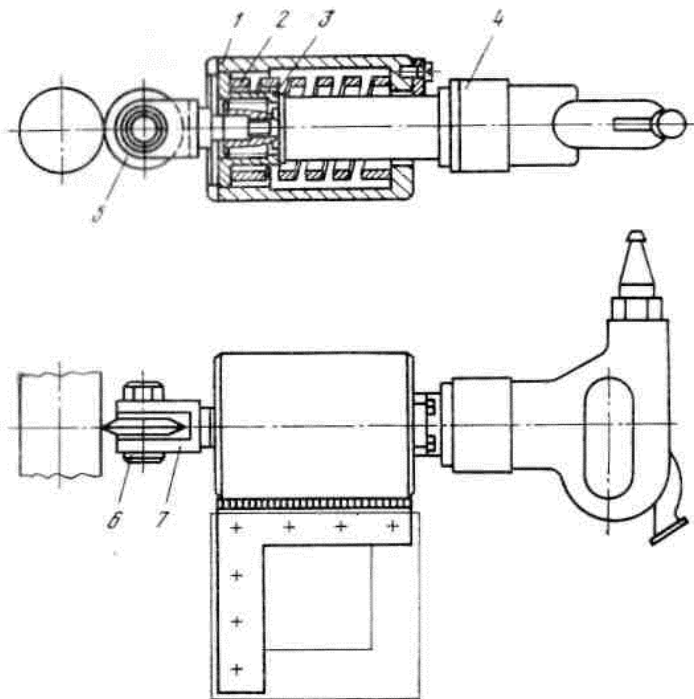


Рис. 9.6. Пневматический чеканочный молоток с вибрирующим роликом:
 1 – стакан; 2 – тарированная пружина; 3 – гайка; 4 – пневматический молоток;
 5 – ролик; 6 – ось ролика; 7 – вилка (хвостовик вилки устанавливается в молоток
 вместо обычного рабочего инструмента)

Чеканку выполняют нанесением частых и сильных ударов по упрочняемой поверхности роликом или бойком, приводимым в действие сжатым воздухом. Работают при давлении сжатого воздуха 50–55 МПа. Частота ударов составляет 1000–1300 в мин; энергия удара – 30–45 Н·м.

Одношпиндельное ударное приспособление, представленное на рис. 9.7, может быть установлено на столе горизонтально-фрезерного или на суппорте токарного станка. Приспособление выполнено в виде ударного механизма кулачкового типа с приводом от электродвигателя через кинематическую передачу. Частота ударов бойка сферического типа 700–1500 в минуту (регулируемая). Энергия удара составляет 5–75 Н·м, глубина упрочнённого слоя – 3–14 мм.

Чеканочное приспособление с вибрирующим роликом механического действия предназначено для упрочнения галтелей крупных валов. Приспособление состоит из зубчатого сектора и подвижной каретки с кулачковым механизмом для создания движения шпинделя бойка. Возвратное движение шпинделя осуществляется за счёт пружины. При вращении

кулачка электродвигателя боёк шпинделя наносит частые удары по вибрирующему сменному ролику, которые передаются на упрочняемую деталь. Одновременно ролик, прижатый к детали рычагом с помощью тарированной пружины, обкатывает обрабатываемую поверхность. Передвижная каретка может быть установлена под углом к оси обрабатываемого вала.

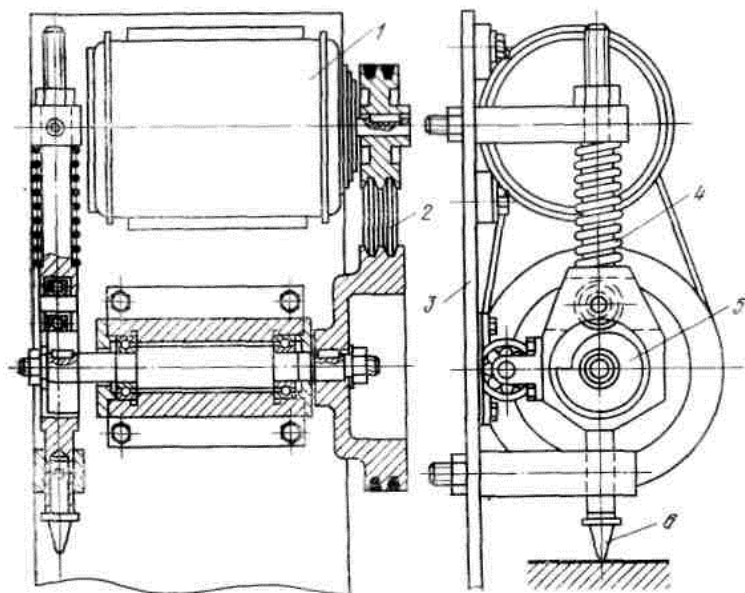


Рис. 9.7. Чеканочное пружинно-кулачковое приспособление:
 1 – двигатель; 2 – клиноремённая передача; 3 – корпус (рама); 4 – пружина;
 5 – профильный плоский кулачок; 6 – боёк, перемещающийся в направляющих

9.4.2. Многобойковое чеканное устройство

Устройство состоит из пневматического молотка и многобойкового наконечника в виде пучка проволоки. Существует несколько типоразмеров пучковых упрочнителей, отличающихся энергией удара (от 6 до 16 Н·м), размерами и формой пучка проволоки (игл). Упрочнители работают от сети сжатого воздуха при давлении 0,4–0,5 МПа.

На рис. 9.8 показана схема многобойкового упрочнителя конструкции ЦНИИТМАШ.

На пневматический молоток 9 посажен корпус 2 с окончанием в виде сопла. Корпус, имеющий продольный пружинящий разрез, закрепляется на молотке с помощью болта 8 и гайки 7. Внутри корпуса расположена стальная втулка 5, в которой помещена коническая разрезная бронзовая втулка 4. Пучок упрочняющих игл 1 размещается внутри втулки 4.

Со стороны соприкосновения игл с бойком концы игл расклёпываются, что предотвращает их выпадение во время работы. Иглы проходят через сопло корпуса 2, собираются в один пучок. Боек 6 под действием сжатого воздуха сообщает иглам поступательное движение, а спиральная пружина 3 возвращает их в первоначальное положение. Таким образом, ударник в виде пучка проволоки наносит сильные и частые удары по обрабатываемой поверхности и производит упрочняющий наклёп, например, сварного шва и околшовной зоны.

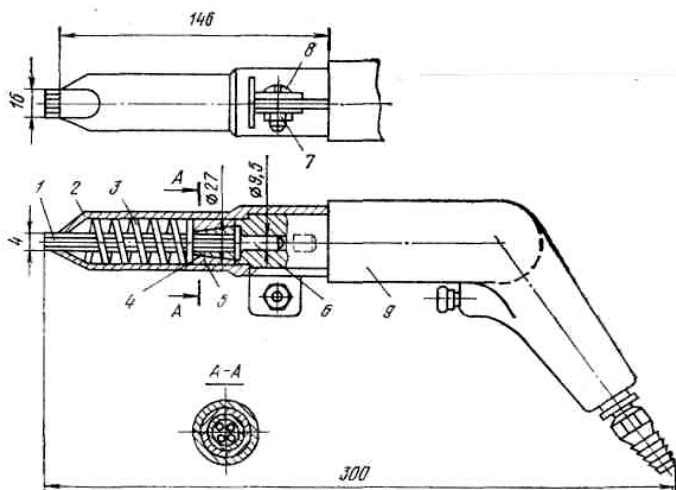


Рис. 9.8. Многобойковый упрочнитель

Для изготовления игл используют пружинную проволоку из стали 65Г диаметром 1,2–3,0 мм с закалкой на твёрдость HRC 45–50. Пучковые упрочнители позволяют получить глубину наклёпанного слоя для сталей средней твёрдости около 2–2,5 мм.

Производительность при работе одним пучком упрочнителем при ширине зоны наклёпа 18–20 мм составляет 6–8 м/ч. Большим преимуществом является возможность обработки сварных швов с неровностями (впадины на неровной поверхности также хорошо проклёпываются, как и выступы). Это достигается благодаря значительной длине составляющих пучок проволоки и возможности разной степени их продольного изгиба.

9.5. Дробеструйный наклёп

В основе процесса дробеструйного наклёпа лежит пластическое деформирование поверхностного слоя детали под действием кинетической энергии потока дроби.

Дробеструйная обработка выполняется на пневматических или механических дробемётах. В первом случае дробь движется под действием

сжатого воздуха. Во втором случае дробь движется центробежной силой, развивающейся в быстровращающемся роторе. Наибольшее распространение получили дробемёты механического типа.

С увеличением твёрдости материала детали глубина наклёпа уменьшается, а с увеличением скорости, диаметра дроби и угла атаки (угол наклона струи к обрабатываемой поверхности) – увеличивается. Глубина наклёпа и остаточные напряжения, в первую очередь, зависят от физических и механических свойств материала детали.

Дробеструйной обработкой можно получить глубину наклёпа до 1,5 мм (обычно 0,5–0,7 мм), твёрдость, например, нормализованной стали 20 увеличивается на 40%, а стали 45 – на 20%. В наклёпанном слое возникают остаточные напряжения до 600–700 Н/мм².

Упрочнение дробеструйным наклёпом позволяет увеличить срок службы сварных швов на 310%, коленчатых валов двигателей – на 900%, спиральных пружин – на 1370%, рессор – на 1200%, крупномодульных зубчатых колёс – на 1400%. Эффективность упрочнения дробью возрастает с ростом концентрации напряжений и применением закалки.

Остаточные напряжения сжатия, возникающие при наклёпе, существенно повышают коррозионно-усталостную прочность стали и позволяют приблизить её до уровня усталостной прочности на воздухе.

Шероховатость поверхности при наклёпе дробью несколько повышается, поэтому для получения чистой поверхности необходимо её подвергать финишным операциям.

Дробемётные установки

На рис. 9.9 представлена схема универсального дробемёта конструкции ЦНИИТМАШ.

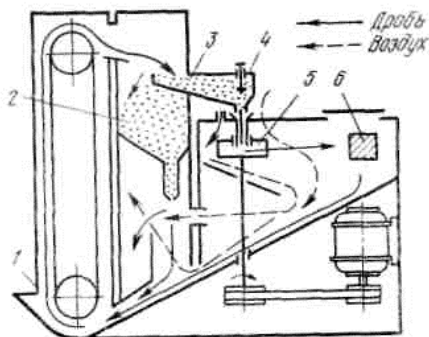


Рис. 9.9. Схема универсального дробемёта

Дробь засыпают в бункер 1. Элеватором она поднимается в загрузочный бункер 3, а избыток дроби поступает в бункер 2. При открытом питателе 4 дробь по вертикальному трубопроводу поступает к центру быстро-

вращающегося ротора 5 с лопатками, который направляет её на обрабатываемую поверхность детали 6. После удара о поверхность дробь скатывается к приёмной части элеватора и вновь поступает в загрузочный бункер.

Масса дробемётной установки ДУ-1 составляет 1440 кг. Размер её загрузочной камеры 1000х300х300 мм. Максимальная скорость дробы составляет 70 м/с, производительность ротора – до 130 кг/мин.

Для местной упрочняющей обработки поверхности широкое распространение получили установки типа БДУ-Э2М, представленные на рис. 9.10.

Установка состоит из системы подачи 2, сбора 1 и очистки 5 дробы и рабочей камеры 10, соединённой с основными системами установки посредством двух рукавов: подачи дробевоздушной смеси 7 и отсоса дробы 6. Рабочая камера состоит из штуцера 8 и сопла 9, подающего дробь на поверхность заготовки 12 и полости разрежения 13 через штуцер 4, которой дробь отводится из камеры. Во избежание вылета дробы из камеры предусмотрено щёточное уплотнение 11. Установка смонтирована на тележке 3 и может транспортироваться. Деформирующие тела – дробь диаметром до 2 мм. Масса загружаемой дробы – до 100 кг. В промышленности установки типа БДУ применяют для местного упрочнения и формообразования деталей из листов и плит.

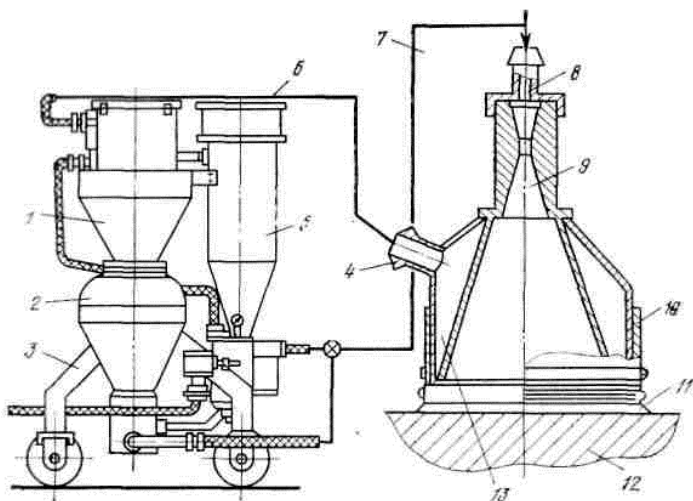


Рис. 9.10. Дробеструйная установка БДУ-Э2М

Диаметр ротора дробемётной установки обычно составляет 200–500 мм при ширине 45–125 мм. Частота вращения ротора находится в пределах от 600 до 3500 об/мин.

Наклёп производят чугунной или прочной стальной дробью (Ст4). Чем выше динамическая прочность и однородность по размерам и твёр-

дости, тем лучше технологические свойства дробы. Практика показывает, что расход стальной дробы в 30–60 раз меньше, чем чугунной, и несмотря на то, что она в 4–5 раз дороже чугунной. Поэтому расходы на стальную дробь в 8–10 раз меньше, чем на чугунную дробь.

Стальную дробь изготавливают из пружинной проволоки диаметром 0,4–2 мм путём рубки на специальных установках. Такая дробь перед употреблением для обработки деталей должна пройти обкатку в течение 10 ч, с целью придания ей сферической формы. В процессе предварительной обкатки, а также дробеструйной обработки, дробь приобретает повышенную твёрдость, достигающую до HRC 50. Мелкую дробь используют для мелких деталей или при необходимости получения небольшой шероховатости поверхности.

Максимальная скорость чугунной дробы составляет 90 м/с и лимитируется её прочностью. Скорость стальной дробы может быть в 1,5–2 раза выше. Обычно скорость потока дробы составляет 50–70 м/с. Интенсивность потока дробы составляет 50–80 кг/мин. Продолжительность обдува длится 0,5–5 мин. Угол атаки – 60–90°.

9.6. Упрочнение энергией взрыва

Упрочнением энергией взрыва можно повысить износостойкость, твёрдость поверхностного слоя, статическую и усталостную прочность, улучшить качество поверхностного слоя металла.

При ударе с большой скоростью, свойственной взрыву, эффект упрочнения возрастает по мере возрастания скорости удара. В металле могут возникать высокие локальные температуры, вызывающие фазовые превращения в локальных местах. Одновременно действуют процессы, присущие упрочнению при обычных скоростях деформирования, такие, как двойникование и сдвиги.

На рис. 9.11 показана схема процесса упрочнения с помощью взрыва.

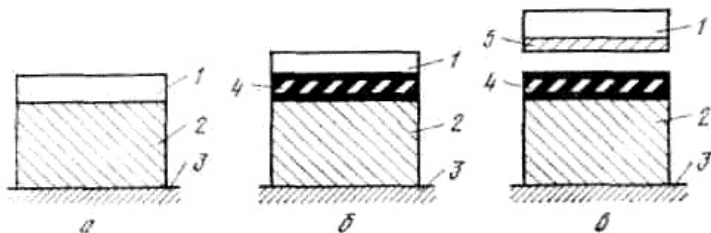


Рис. 9.11. Схема процесса упрочнения с помощью взрыва:

- а – с укладкой взрывчатого вещества на поверхность;
- б – с использованием передающей среды; в – с метанием пластины на поверхность;
- 1 – заряд; 2 – деталь; 3 – опора; 4 – среда; 5 – пластина

Схему упрочнения наложением заряда взрывчатого вещества на упрочняемую поверхность применяют для упрочнения деталей большого размера в том случае, если к ним не предъявляют высокие требования в отношении шероховатости поверхности и если имеется припуск на обработку поверхности, повреждаемой взрывом. Схема эффективна при упрочнении деталей, выполненных методом горячего проката, горячей штамповки, литья. Припуск должен быть достаточным для устранения поверхностных дефектов и быть меньше толщины упрочнённого слоя. Окончательная обработка резанием не должна сопровождаться появлением высокой температуры и разрушением поверхности.

Схему упрочнения взрывом в передающей среде применяют для упрочнения точных и высокопрочных деталей, в том числе деталей сложной геометрической формы. Передающая среда служит защитой обрабатываемой поверхности от повреждения в результате действия взрывчатого вещества. Она передаёт импульс взрыва взрывчатого вещества и воздействует на обрабатываемую поверхность, регулирует давление и длительность действия импульса.

Изменение плотности и толщины слоя среды регулирует глубину и степень наклёпа материала различной прочности. Плотность среды должна быть тем большей, чем большую нужно получить глубину и степень наклёпа. Чем выше прочность обрабатываемого материала, тем большей должна быть плотность передающей среды.

В качестве передающей среды используют воздух, воду и другие инертные вещества. При использовании воды следует иметь в виду, что в результате неполной смачиваемости на поверхности детали могут скапливаться мельчайшие пузырьки воздуха. Под действием высокого давления ударной волны происходят микровзрывы пузырьков воздуха, что приводит к повреждению поверхности. Во избежание этого обрабатываемую поверхность покрывают специальными смазочными материалами, обеспечивающими её смачиваемость, или удаляют пузырьки тонкой волосяной щёткой.

Основным источником энергии при упрочнении металлов взрывом служат гексоген и тротил. Иногда для получения основного заряда используют детонирующий шнур, который укладывают соответственно форме детали. Детонирующий шнур ДШ-А – это высокобризантное взрывчатое вещество, помещённое в хлопчатобумажную оплётку. Внутри сердцевины по всей длине шнура проходят направляющие нити. Сверху шнур покрыт парафиновой изоляцией. Это позволяет использовать его в воде. Детонирующий шнур создаёт скорость детонации не менее 6500 м/с. Шнур легко и безопасно можно резать острым ножом на деревянной доске; его изготавливают отрезками длиной до 50 м, свёрнутыми в бухты.

В качестве основного заряда часто применяют так называемые пластические взрывчатые вещества – консистентную смазку, получаемую при смешивании твёрдых взрывчатых веществ с воском или парафином.

В табл. 9.2 представлены взрывчатые вещества, применяемые для упрочнения различных материалов.

Таблица 9.2

Взрывчатые вещества, применяемые при упрочнении материалов

Взрывчатое вещество	Консистенция	Область применения
Гексоген	Флегматизированный	Основной заряд
Тротил	Пассивный	
Тротил	Порошкообразный	
PETN	Пластический	
ТЭН	В детонирующем шнуре	Основной и вспомогательный заряды
Электродетонатор	-	Иницирующий заряды
Аммонит	Порошкообразный	Иницирующий и основной заряды

10. ДЕФЕКТЫ НАПЛАВОК И НАПЫЛЕНИЯ. ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ И МЕТОДЫ ИХ ОБНАРУЖЕНИЯ

10.1. Дефекты наплавки и меры их предотвращения

По своему характеру дефекты наплавки делят на внутренние, не обнаруживаемые внешним осмотром, и наружные, которые выявляются при визуальном осмотре наплавленной детали. К внутренним дефектам относятся трещины, пористость, непровар, шлаковые включения.

10.1.1. Трещины

При наплавке на основной металл с неудовлетворительной свариваемостью или при высокой твёрдости наплавленного металла зачастую образуются сварочные трещины, что может быть связано с чрезмерно большими термическими напряжениями, возникающими, в частности, при сплошной наплавке по большой поверхности.

Причинами образования трещин могут быть:

- наплавка деталей из конструкционных легированных сталей в жёстко заделанных контурах;
- глубокий провар детали из толстолистовой кипящей стали вследствие повышенного содержания серы, ликвирующей в толще металла при кристаллизации наплавленного металла;
- высокая скорость охлаждения при наплавке углеродистых сталей, склонных к закалке на воздухе;
- применение высокоуглеродистой электродной проволоки при наплавке конструкционной легированной стали;
- малый коэффициент формы провара (глубокие и узкие швы) при автоматической наплавке под флюсом;

– выполнение наплавочных работ при температуре, когда пластические свойства основного металла низкие;

– наличие в наплавленном металле других пороков, являющихся концентратами напряжений (непровары, поры, шлаковые включения и т.д.).

Для предотвращения образования трещин обычно применяют следующие меры:

- 1) предварительный и сопутствующий подогрев во время наплавки для поддержания заданной температуры нагрева основного металла, например, представленный для стеллита в табл. 10.1;
- 2) нагрев изделий непосредственно после наплавки и замедленное охлаждение наплавленного металла;
- 3) последующую термообработку для снятия напряжений;
- 4) наплавку пластичного подслоя на поверхность основного металла;
- 5) уменьшение числа слоёв при многослойной износостойкой наплавке;
- 6) выбор для износостойкой наплавки способов, вызывающих меньшие термические напряжения в изделиях (табл. 10.2); при наплавке участков поверхности с потенциальной концентрацией напряжений следует применять, например, наплавку в два приёма, как показано на рис. 10.1;
- 7) правильный выбор наплавочного материала для первого слоя коррозионно-стойкой наплавки с учётом характера влияния основного металла на состав наплавленного слоя;
- 8) выполнение наплавки только после удаления с поверхности основного металла поверхностного слоя, содержащего дефекты или имеющего повышенную твёрдость.

Таблица 10.1

Температура подогрева деталей при наплавке стеллита, °С

Основной металл. Сталь	Температура подогрева при наплавке	
	газовой литыми прутками	покрытыми электродами
Низкоуглеродистая	400–450	300–350
Углеродистая (0,45% С)	400–450	300–350
Хромомолибденовая (2,25% Cr, 1% Mo)	450–550	300–400
Аустенитная коррозионно-стойкая	300–350	250–300
Мартенситная коррозионно-стойкая	450–550	300–350

Примечания: 1. Во время наплавки температура поверхности основного металла должна быть не ниже указанной. 2. Изделия с площадью наплавляемой поверхности менее 50х50 мм можно подвергать подогреву ацетиленокислородным пламенем непосредственно перед наплавкой.

При наплавке борсодержащего мартенситного материала, осуществляемой с целью повышения износостойкости изделия, наличие небольших трещин в наплавленном металле иногда допустимо.

Трещины являются наиболее опасным дефектом наплавки, так как под действием быстро изменяющихся нагрузок или тепловых колебаний режима работы детали они могут развиваться, т.е. увеличиваться в размерах, преждевременно вывести деталь из строя

Таблица 10.2

Способы ручной наплавки валиков покрытыми электродами

Эскиз	Наплавка	Примечание
	1. Сетчатая	Способствует снижению погонной энергии и чувствительности к трещинам; при попадании грунта в узлы сетки повышается стойкость к абразивному изнашиванию
	2. Полосчатая	Равноценна сетчатой наплавке
	3. Сплошная	Имеет наиболее широкое применение
	4. Линейчатая	Сочетание разнообразных наплавочных материалов (твёрдых сплавов, коррозионно-стойкой, перлитной стали и др.) предотвращает образование трещин и отрыва наплавленного металла от основного
	5. Точечная	Снижает вредное влияние на основной металл, сокращает потребление наплавочных материалов и повышает износостойкость покрытий; отличается трудоёмкостью, поскольку наплавка не является непрерывной

Трещины могут располагаться поперёк (поперечные) или вдоль (продольные) наплавленного валика. Размеры трещин могут быть различны: по длине – от долей миллиметра до десятков сантиметров, по ширине – от долей миллиметра до нескольких миллиметров. Различают микроскопические трещины, незаметные для невооружённого глаза, и макроскопические, которые легко обнаруживаются при внешнем осмотре наплавки.

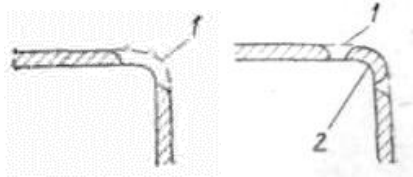


Рис. 10.1. Приёмы наплавки угловых участков поверхности детали:
1 – участок, наплавляемый в последнюю очередь; 2 – участок, наплавляемый вначале

10.1.2. Поры

Поры в наплавленном металле появляются, как правило, в результате большой газонасыщенности и быстрого затвердевания расплавленного металла. При охлаждении наплавленного металла растворимость газов в нём уменьшается. Газы стараются выделиться из металла, но кристаллизующийся металл шва препятствует их выходу, в результате чего часть газов остаётся в металле наплавки.

Причины образования пор в наплавленном металле следующие:

- при ручной наплавке с использованием электродов с покрытием, содержащим органические составляющие (крахмал, декстрин и т.д.); в результате разложения этих органических составляющих происходит насыщение металла водородом и окисью углерода;

- повышенное содержание углерода в основном металле или сварочном материале (в процессе наплавки происходит выгорание углерода, в металле шва возникают поры, заполненные углекислым газом и окисью углерода);

- повышенная влажность электродного покрытия или флюса, когда в процессе наплавки происходит разложение паров воды, при диссоциации которых выделяется водород, растворяющийся в жидком металле;

- высокая скорость наплавки, когда вследствие быстрого затвердевания сварочной ванны замедляется выход газов из расплавленного металла;

- наличие на наплавляемой поверхности масла, ржавчины, краски и т.п.;

- недостаточная защита сварочной дуги от окружающего воздуха;

- применение газов с повышенным содержанием паров воды при наплавке в среде защитного газа.

Одиночные поры не снижают вибрационной прочности наплавленной детали. С увеличением количества пор предел выносливости падает незначительно, однако при наличии цепочки пор его снижение уже существенно.

Поры являются менее опасным дефектом наплавки, чем трещины, но их наличие делает металл неплотным и проницаемым для газов и жидкостей, что снижает прочность и износостойкость наплавленного металла. Поры в металле чаще образуются при наплавке в среде защитных газов и при вибродуговой наплавке, реже – при наплавке под флюсом.

В металле могут образоваться как отдельные поры, так и их группы или цепочки. Поры могут выходить на поверхность металла или находиться внутри наплавленного слоя.

Для предотвращения образования пор и раковин необходимо:

- 1) зачищать поверхность основного металла от ржавчины, масла и других загрязнений;
- 2) обеспечить хранение флюса и наплавочных материалов в условиях, исключающих поглощение влаги, и их прокалку перед использованием для наплавки;
- 3) при газовой наплавке воздерживаться от подачи наплавочного материала к очагу наплавки до момента запотевания поверхности основного металла и от резкого удаления пламени при окончании наплавки, применять горючие смеси, обеспечивающие получение науглероживающего пламени;
- 4) при дуговой наплавке воздерживаться от применения большой силы тока и излишних поперечных колебаний электрода, поддерживать оптимальную длину дуги;
- 5) предотвращать проведение наплавки в условиях неудовлетворительной защиты зоны дуги (обеспечение необходимой защиты сварочной ванны флюсом-шлаком или защитным газом).

10.1.3. Подрезы

Подрезы представляют собой выхваты в основном металле в виде канавок, идущих вдоль наплавленного валика. Причиной образования подрезов является применение при наплавке повышенного тока и напряжения дуги.

Подрезы вызывают местную концентрацию напряжений, что может вызвать разрушение наплавленной детали в процессе эксплуатации. Для устранения этих дефектов наплавляют по месту подрезов дополнительные валики.

Для предотвращения подрезов, особенно характерных для наплавки ленточным электродом, необходимо:

- 1) исключать наклон наплавляемой поверхности более чем на 3° к горизонту;
- 2) воздерживаться от чрезмерного повышения скорости наплавки;
- 3) обеспечивать надлежащее положение дуги, исключающее магнитное дутьё;
- 4) выбирать оптимальные способы наложения валиков с необходимым их перекрытием.

10.1.4. Шлаковые включения

Шлаковые, или неметаллические, включения возникают вследствие окисления легирующих элементов электродного и основного металлов, окислы которых и находятся в металле в виде инородных включений. Такие включения также могут явиться и результатом попадания в сварочную ванну кусочков шлака или окалины и др.

Шлаковые включения чаще встречаются при многослойной наплавке, особенно, если плохо удалили шлаковую корку с того места, на которое производится наплавка: шлак не успевает расплавиться и всплыть на поверхность металла, оставаясь в металле в виде инородных включений.

Шлаковые включения могут быть микроскопическими, незаметными для невооружённого глаза, и макроскопическими, которые можно обнаружить, осматривая наплавку и микрошлифы. Микроскопические неметаллические включения всегда есть в металле, их количество зависит от способа наплавки, технологии наплавки и т.п. Из-за микроскопических включений наплавленную деталь, как правило, не бракуют. Макроскопические шлаковые включения снижают прочность и износостойкость наплавленных деталей.

Причиной возникновения шлаковых включений могут быть тугоплавкость шлака и его высокий удельный вес; повышенная скорость кристаллизации ванны в связи с большой скоростью её охлаждения; наличие загрязнений на наплавливаемой поверхности; плохая очистка от шлака при многослойной наплавке; недоброкачественное электродное покрытие; недостаточная квалификация сварщика-наплавщика и др.

10.1.5. Непровар

Непровар – отсутствие сплавления, т.е. структурной связи между прилегающими один к другому объёмами металла. Непровар может быть между основным и наплавленным металлом, а также между отдельными слоями наплавленного металла.

Причинами непровара могут быть:

- плохая подготовка поверхности, подлежащей наплавке, наличие на ней окалины, ржавчины, краски, шлака, масла и других загрязнений;
- недостаточная тепловая мощность дуги;
- блуждание или отклонение дуги под влиянием магнитных полей (особенно при наплавке на постоянном токе);
- неудовлетворительное качество сварочных материалов;
- нарушение электрических характеристик наплавочных установок;
- колебания силы сварочного тока и напряжения на дуге в процессе наплавки.

10.1.6. Несплавления

Несплавления наплавленного металла с основным металлом детали возникают при слишком большой для данного тока и напряжения дуги скорости наплавки, неправильной установке электрода. Особенно часты несплавления при наплавке у галтелей в том случае, если электрод установлен вертикально к месту наплавки, а не под соответствующим углом.

В месте несплавления создаётся высокая концентрация напряжений, что может привести к отколу наплавленного слоя в процессе работы.

10.1.7. Наплывы и натёки

Наплывы и натёки – излишне наплавленный металл на наружной части наплавленного металла.

Причины образования наплывов и натёков:

- чрезмерная длина сварочной дуги;
- блуждание сварочной дуги и отклонение её от сварочной ванны (при наплавке на постоянном токе);
- слишком малая скорость наплавки при большой скорости плавления электродной проволоки;
- чрезмерный наклон плоскости, на которую наплавливают металл;
- неправильное смещение электродной проволоки при наплавке тел вращения;
- выполнение вертикальных швов снизу вверх и т.д.

Наплывы и натёки являются концентраторами напряжений и тем самым снижают вибрационную прочность швов.

10.1.8. Прожог

Прожог – сквозное проплавление наплавливаемой детали, который может быть:

- при завышенной тепловой мощности, вызванной чрезмерной величиной сварочного тока;
- при очень малой скорости наплавки;
- при неполном прилегании флюсовой подушки или металлической подкладки и т.д.

Во всех случаях отверстия, возникающие при прожогах, заплывают, но шов в этом месте получается неполноценным по качеству.

10.1.9. Пористость и ноздреватость

Дефекты пористости и ноздреватости, выходящие на поверхность наплавленного металла, наблюдаются при ручной наплавке толсто покрытыми электродами, автоматической наплавке под флюсом или в среде защитного газа. Причинами этого дефекта являются:

- растворённые в металле газы;
- применение вязкого шлака с плохой газопроницаемостью;
- недостаточная защита сварочной дуги от воздействия окружающего воздуха;
- недостаточная чистота защитного газа.

10.1.10. Кратеры

Кратеры – углубления в наплавленном валике; их образует дуга, оказывающая давление на жидкий металл сварочной ванны и выдавливающая его на некоторое расстояние в сторону, противоположную направлению своего перемещения.

С увеличением силы тока длина кратера увеличивается. При многоэлектродной наплавке с увеличением количества электродов, одновременно подаваемых в зону дуги, длина кратера уменьшается, а его ширина увеличивается. Аналогичное явление наблюдается и при наплавке ленточным электродом.

Кратеры, как и другие неровности наплавленного слоя, увеличивают трудоёмкость механической обработки, потери металла на снятие стружки. Поэтому кратеры необходимо заваривать, что достигается некоторым горением дуги на месте, т.е. при прекращении наплавки, сначала нужно выключить механизм перемещения дуги, а затем выключить ток.

10.1.11. Деформации и коробления наплавленных изделий

Деформации и коробления наплавленных изделий – отклонение формы детали от проектной формы.

Причины, вызывающие деформации и коробления при наплавке:

- неравномерный местный нагрев и охлаждение изделий;
- слишком большое количество наплавленного металла;
- неправильный порядок наложения швов;
- нарушение технологического процесса наплавки и т.д.

10.2. Методы контроля наплавленных деталей

Все наплавленные детали подвергают внешнему осмотру, который следует проводить при хорошем освещении. Мелкие дефекты в ответственных конструкциях выявляют при помощи лупы 20-кратного увеличения. Если деталь оказывается не совсем доброкачественной, то осмотр позволяет наметить места наиболее вероятного образования дефектов, которые тщательно обследуют другими методами контроля.

При осмотре деталей, подготовленных к наплавке, проверяют чистоту наплавливаемых поверхностей, а при помощи мерительного инструмента определяют количество слоёв металла, необходимое для восстановления детали. Перед наплавкой литых деталей (конуса засыпных аппаратов доменных печей) при внешнем осмотре можно обнаружить песочины (включения формовочной массы) и дефекты, которые должны быть устранены.

Температуру нагрева детали, например, контролируют специальными термокарандашами: цвет черты, проведённой таким карандашом на металле, через некоторое время изменяется в зависимости от температуры.

При наплавке у галтелей, чтобы предотвратить непровары, проверяют угол наклона электрода.

Тщательно осматривая поверхность наплавленного слоя, можно обнаружить трещины, поры и другие, выходящие на поверхность металла, дефекты.

Соответствие детали размерам, предусмотренным чертежом, определяют при помощи различных мерительных инструментов.

10.2.1. Металлографические методы контроля

При металлографических методах контроля качество металла определяют путём исследования макро- и микрошлифов. Темплеты для изготовления шлифов вырезают из наплавленной детали, затем их подвергают строжке, шлифованию, полированию и, для выявления структуры, травлению в специальных растворах, обычно состоящих из смеси кислот.

Макрошлифы рассматривают невооружённым глазом или в лупу, например, 20-кратного увеличения. При этом можно установить макроструктуру металла, определить величину зоны термического влияния и выявить сравнительно крупные дефекты в металле. Кроме того, на макрошлифах можно довольно точно измерить твёрдость металла.

Микрошлифы исследуют при помощи специальных микроскопов при увеличении в 100–1200 раз и более. При этом можно исследовать микроструктуру металла, определить твёрдость отдельных структурных составляющих и выявить очень мелкие внутренние дефекты металла (поры, трещины, шлаковые включения и др.).

10.2.2. Контроль твёрдости наплавленного металла

Для определения твёрдости наплавленного металла непосредственно на детали служит прибор Польди. Более точно твёрдость измеряют на макро- и микрошлифах с помощью приборов Бринелля и Роквелла.

Способ Бринелля. При этом способе измерения твёрдости стальной закалённый шарик под действием определённой нагрузки вдавливается в испытываемый металл и оставляет в металле отпечаток (лунку).

Твёрдость по Бринеллю (HB) определяется величиной нагрузки на шарик (в кг), делённой на площадь отпечатка (в $мм^2$).

Способ Роквелла. При этом способе определения твёрдости в испытываемый металл вдавливают стальной закалённый шарик диаметром 1,58 мм под нагрузкой, равной 100 кг, или алмаз конической формы под нагрузкой, равной 150 кг. Твёрдость определяется глубиной образующейся лунки: чем больше глубина лунки, тем меньше твёрдость испытываемого металла. Твёрдость связана с тремя шкалами прибора Роквелла: шкала B – красного цвета для определения твёрдости при испытании шариком; шкала C – чёрного цвета для определения твёрдости при испытании алмазом (нагрузка равна 150 кг); шкала A – для испытания алмазом твёрдых сплавов при нагрузке, равной 60 кг. Соответственно твёрдость обозначают HRB , HRC , HRA .

Способ Польди. Твёрдость определяют прибором Польди, который состоит из стального бойка, помещённого внутрь полый рукоятки, и стального шарика диаметром 10 мм. Между бойком и шариком вводят стальной эталонный брусок, твёрдость которого известна.

Шарик устанавливают на испытываемую деталь и по бойку наносят удар молотком. При этом на эталонном бруске и детали от шарика обра-

зается лунка. Измеряют диаметры лунок и по таблице находят твёрдость испытуемого металла. Так как при определении твёрдости сравнивают диаметры отпечатков, то сила удара не имеет большого значения. Измерение твёрдости является не слишком точным, но её можно определять непосредственно на изделиях и деталях.

10.2.3. Контроль химического состава наплавленного металла

Для определения химического состава наплавленного металла пользуются химическим или спектральным методом по специальным методикам. Спектральным анализом устанавливают состав металла лишь в одной определённой точке, достоверность результатов зависит от равномерности распределения примесей в металле, химический анализ даёт более усреднённые данные.

Для спектрального анализа достаточно вырезать темплет из наплавленного образца, для химического анализа обычно берут стружку металла. Если невозможно взять стружку (например, при анализе наплавки, выполненной электродами Т-590) или измельчить образец твёрдого сплава другим способом, состав металла анализируют спектральным методом. Стружка для анализа не должна быть загрязнена окалиной, маслом и другими веществами. Диаметр сверла обычно не превышает 5–10 мм, чтобы стружка была не слишком крупной. При сверлении режущий инструмент нельзя смачивать водой, маслом и др.

Режим сверления выбирают таким, чтобы на стружке не появлялись цвета побежалости, т.е. чтобы стружка не перегревалась. Для получения усреднённых результатов сверление проводят в нескольких местах наплавленного слоя. Глубина сверления должна быть такой, чтобы не задеть основного металла.

10.2.4. Просвечивание металла рентгеновскими и гамма-лучами

Эти методы контроля позволяют обнаруживать внутренние дефекты металла, не разрушая детали или конструкции.

Рентгеновские аппараты, применяемые для контроля изделий, состоят из рентгеновской трубки, источника питания и пульта управления. В качестве источника питания применяют повышающий трансформатор, во вторичную цепь которого включают кенотроны для выпрямления анодного тока и высоковольтные конденсаторы, позволяющие удвоить или утроить напряжение вторичной обмотки трансформатора.

В установках для просвечивания гамма-лучами в качестве источников гамма-излучения применяют искусственные радиоактивные изотопы, позволяющие просвечивать металл большой толщины (до 150 мм).

10.2.5. Контроль при помощи ультразвука

Основными величинами, характеризующими звуковые волны, являются длина волны, скорость звука и частота колебаний.

Метод контроля при помощи ультразвука основан на способности ультразвуковых колебаний (частотой свыше 20000 Гц) распространяться в различных средах и отражаться от границы двух сред.

Ультразвуковые дефектоскопы работают по методу звуковой тени или импульсной подачи ультразвуковых волн. На рис. 10.2 показана принципиальная схема ультразвукового дефектоскопа.

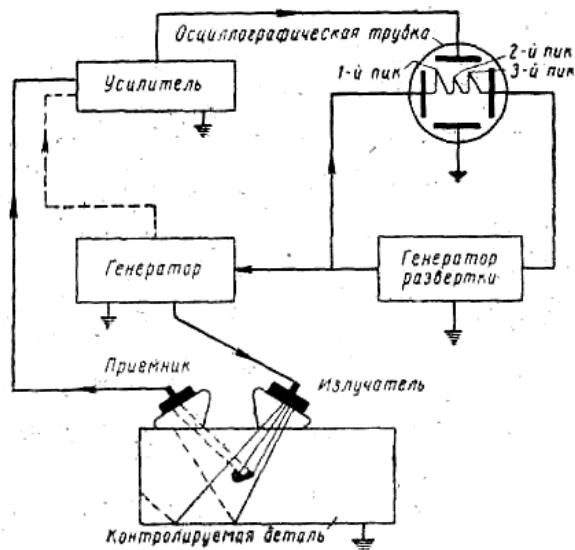


Рис. 10.2. Принципиальная схема ультразвукового дефектоскопа

Пластинка из титаната бария или кварца, обладающая свойством преобразовывать колебания наложенного на неё переменного электрического поля в механические колебания той же частоты, служит излучателем ультразвуковых волн. Приёмником является такая же пластинка, преобразующая ультразвуковые колебания в электрические колебания.

Приёмная и излучающая пластины, токоподводы к ним и малогабаритный корпус образуют щуп. Генератор, вырабатывающий короткие импульсы тока высокой частоты, чередующиеся с относительно длинными паузами, предназначен для питания излучателя щупа.

При подаче генератором каждого импульса тока происходит следующее:

- момент протекания импульса тока фиксируется на экране осциллографа в виде вертикального отклонения электронного луча 1-го пика, получаемого при помощи генератора развёртки;

- в течение паузы за определённое время ультразвуковые волны распространяются вглубь металла, встретив на пути какой-либо дефект, они

отражаются и попадают на приёмник, вырабатывающий токовый сигнал, который после усиления фиксируется в виде 2-го пика на экране осциллографа;

– 3-й пик на экране трубки представляет собой токовый сигнал, полученный от ультразвуковых волн, отражённых от нижней части наплавленного детали.

На наличие дефекта в изделии указывает появление 2-го пика, а глубина его залегания определяется между 1-м и 2-м пиками и регистрируется специальным устройством – глубиномером.

При определении качества наплавки ультразвуковые волны вводят в наплавку и зону сплавления через основной металл при помощи плоского щупа, как показано на рис. 10.3.

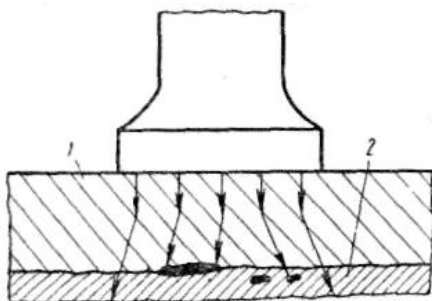


Рис. 10.3. Схема прозвучивания наплавленного слоя плоским щупом:
1 – основной металл; 2 – наплавленный металл

10.2.6. Магнитная дефектоскопия наплавленных деталей

Магнитные методы контроля ферромагнитных материалов основаны на образовании потока рассеяния под дефектом при намагничивании контролируемого изделия. Если наплавленный металл однороден и не имеет несплошностей, то магнитный поток распределяется в нём равномерно, без искажений (рис. 10.4, а). При наличии неоднородных включений в наплавленном металле с другой магнитной проницаемостью или нарушении сплошности, образовавшихся в процессе наплавки, магнитный поток искажается (рис. 10.4, б).

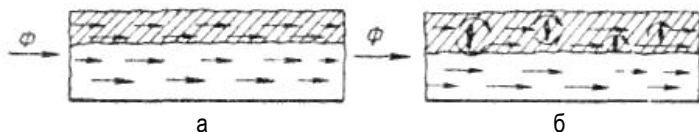


Рис. 10.4. Прохождение магнитного потока по наплавленному изделию

Искажение вызывает появление местных магнитных потоков рассеяния, которые располагаются над дефектами, и, выйдя на поверхность детали, образуют подобие магнита, что обнаруживается.

Для создания магнитных полей различной направленности применяют различные способы намагничивания:

1. Соленоидом (магнитный поток имеет направление вдоль оси наплавленных валиков).
2. Электромагнитом (магнитный поток направлен поперёк оси наплавленных валиков).
3. Циркуляционное намагничивание, осуществляемое пропусканием тока непосредственно через контролируемую деталь. При этом способе выявляются поперечные трещины в шве (рис. 10.5).
4. Комбинированное намагничивание, при котором изделие намагничивается в двух взаимно перпендикулярных направлениях с использованием этого постоянного магнитного потока от электромагнита магнитного поля, создаваемого циркулярным полем переменного тока (рис. 10.6).
5. Импульсное намагничивание, осуществляемое мгновенным пропусканием электрического тока большой силы. Несмотря на кратковременность импульсов ($\sim 10^{-6}$ с), деталь успевает намагничиваться. Однако происходит намагничивание только поверхностного слоя, что позволяет выявлять только поверхностные дефекты.

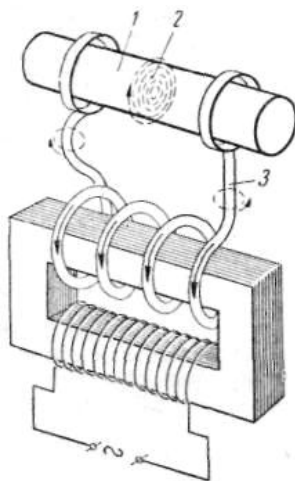


Рис. 10.5. Схема циркулярного намагничивания:
1 – контролируемое изделие; 2 – магнитные силовые линии;
3 – проводник намагничивающего тока

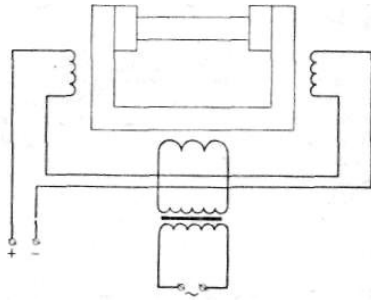


Рис. 10.6. Схема комбинированного намагничивания

В основе метода магнитной дефектоскопии при помощи порошка лежит следующее явление. Если полюса достаточно мощного магнита замкнуть ферромагнитным материалом, например, листом железа, то направление магнитного потока можно обнаружить, поместив на листе железный порошок. Порошок расположится в виде цепочкообразных линий, направленных от одного полюса к другому; у полюсов будет наблюдаться скопление порошка (рис. 10.7).

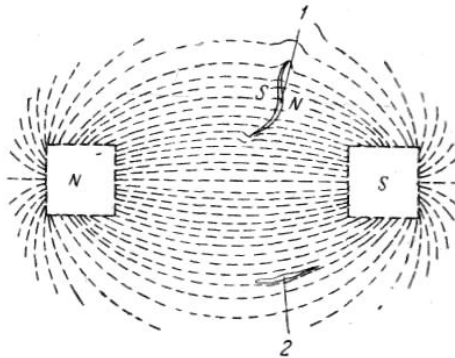


Рис. 10.7. Образование магнитных полюсов и изменение распределения магнитного поля у границ дефектов:

- 1 – дефект расположен поперёк магнитного поля;
- 2 – дефект расположен вдоль магнитного поля

В месте дефекта, например трещины, магнитная проницаемость снижается, и порошок начинает скапливаться. Дефект можно обнаружить в том случае, если он расположен перпендикулярно или под некоторым углом к направлению магнитного поля.

10.2.7. Люминесцентный метод контроля

Люминесцентный метод основан на свойстве некоторых веществ, поглощающих лучистую энергию, издавать собственное свечение.

На рис. 10.8 показана схема люминесцентного метода контроля.

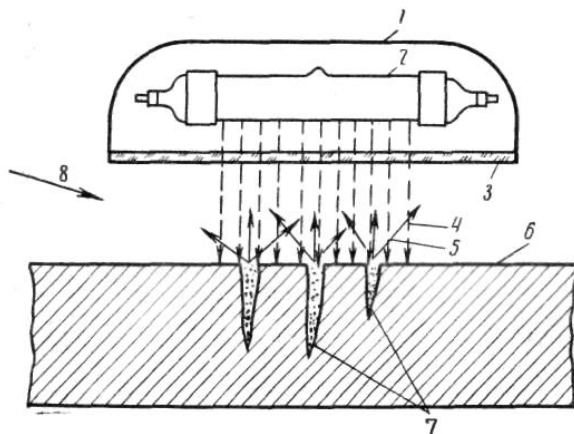


Рис. 10.8. Схема люминесцентного метода контроля:
1 – рефлектор; 2 – ртутно-кварцевая лампа; 3 – светофильтр; 4 – пучок ультрафиолетовых лучей; 5 – поток люминесценции; 6 – контролируемое изделие; 7 – поверхностные дефекты; 8 – направление осмотра контролируемого изделия

Контролируемую деталь погружают в люминофор на несколько минут или наносят люминесцентную жидкость на изделие. Затем деталь вынимают из люминофора и остатки последнего смывают водой, после чего поверхность просушивают тёплым воздухом. Просушенное изделие посыпают тонким порошком окиси магния, углекислого магния, талька или силикагеля, который пропитывается оставшимся в трещинах и порах люминофором. Порошок проникает внутрь порока, неизрасходованные остатки удаляют струёй воздуха.

В специальном затемнённом помещении деталь подвергают облучению ультрафиолетовыми лучами, под действием которых порошок, пропитанный люминофором, светится.

Люминесцентный метод применяют для выявления поверхностных пороков в соединениях из аустенитной стали, цветных и лёгких металлов, их сплавов и других немагнитных материалов. Этим методом можно выявить поверхностные трещины шириной не менее 0,01 мм и глубиной не менее 0,02–0,03 мм.

10.2.8. Метод окрашивания

Метод цветной дефектоскопии позволяет обнаружить внешние дефекты металла, в том числе и дефекты в немагнитных материалах.

Для обнаружения дефектов на поверхность детали наносят слой подкрашенной жидкости. Состав жидкости может быть таким: 80% керосина, 15% трансформаторного масла, 5% скипидара и 10 г краски «судан» на 1 л жидкости. Для хорошего проникновения жидкости в полость

дефектов дают выдержку 15–20 мин. После этого остаток жидкости тщательно удаляют с поверхности и деталь насухо протирают. На сухую поверхность наносят тонкий слой каолина (600–700 г каолина на 1 л воды). Подсыхая, каолин впитывает жидкость, находящуюся в полости дефектов, и окрашивается в красный цвет, что свидетельствует о наличии дефектов.

Цветным методом выявляют поверхностные трещины шириной не менее 0,01 мм при глубине не менее 0,03–0,4 мм.

10.3. Дефекты покрытия и меры их предотвращения

К числу дефектов покрытий относятся отслоение или вздутие покрытия из-за его плохой адгезии к основному металлу, трещины, сплошная пористость, низкая твёрдость и неоднородность структуры. При возникновении в покрытии дефектов необходимо вторичное напыление, для чего покрытие с дефектных участков полностью удаляют вплоть до поверхности основного металла и производят полный цикл обработки, включая очистку поверхности и предварительную её обработку для придания шероховатости.

В случае невозможности удаления старого покрытия путём простого соскабливания, прибегают к механической обработке или химическому травлению погружением в агрессивную среду после наложения защитных масок на участки, не подлежащие удалению покрытия.

10.4. Свойства напылённых покрытий и их испытания

Напылённые покрытия, служащие для защиты поверхности деталей машин от износа или коррозии, должны обладать требуемой прочностью сцепления с подложкой, износостойкостью, жаростойкостью и теплоизоляционными свойствами, коррозионной стойкостью и другими свойствами в зависимости от назначения.

10.4.1. Испытания на прочность сцепления

Адгезия покрытия к основному металлу обеспечивается преимущественно механическим сцеплением, тогда как сплавление, взаимная диффузия и физическая связь вандерваальсовыми силами служат обычно дополнением к механическому сцеплению. Это значит, что прочностью сцепления покрытия с основой определяется величиной и характером шероховатости поверхности основного металла.

Для определения прочности сцепления покрытия с основным металлом применяют следующие способы испытаний:

1. Испытание на прочность сцепления втягиванием штифта (штифтовая проба).
2. Испытание на прочность сцепления на отрыв с использованием клея (клеевая проба).

3. Испытание на прочность сцепления путём сдвига.
4. Прочие способы (изгиб, царапание, циклическая ударная нагрузка, выдавливание).

Схема испытания на прочность сцепления втягиванием штифта показана на рис. 10.9.

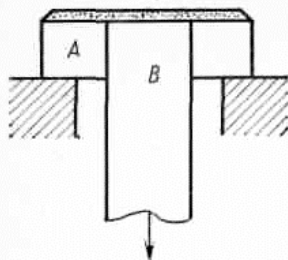


Рис. 10.9. Схема испытания на прочность сцепления втягиванием штифта (штифтовая проба)

В цилиндрическое или коническое центральное отверстие, выполненное в основном металле *A*, вставляют штифт *B* таким образом, чтобы торцовая поверхность штифта и поверхность основы находились в одной плоскости. После сборки и предварительной обработки образцов для придания им шероховатости на верхнюю поверхность собранных образцов напыляют покрытие. При испытании основу *A* устанавливают на упор, а штифт *B* вытягивают вниз. Отношение нагрузки, при которой происходит отрыв штифта от покрытия, к площади его напыленного торца, характеризует прочность сцепления с основой.

Схема испытания на прочность сцепления на отрыв с использованием клея (клеевая проба) показана на рис. 10.10.

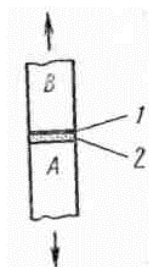


Рис. 10.10. Схема испытания на прочность сцепления с использованием клея (клеевая проба):
1 – клей; 2 – покрытие

Торцевую поверхность цилиндрического образца *A* (основной металл) подвергают предварительной обработке для придания шероховатости.

сти, а затем напыляют на неё требуемое покрытие. К поверхности покрытия приклеивают цилиндрический образец *B*, диаметр которого равен диаметру образца с покрытием, и проводят испытание на растяжение. Прочность сцепления в таком случае определяется как частное от деления разрушающей нагрузки на площадь торцевой поверхности. Толщина напылённого покрытия при этом виде испытаний должна быть не менее 0,25 мм, иметь равномерную толщину по всей поверхности. В качестве клея используют эпоксидную смолу.

На рис. 10.11 показано испытание сдвигом на образце, полученном приклеиванием.

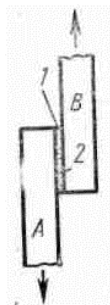


Рис. 10.11. Испытание на прочность сцепления покрытия при сдвиге (плоский склеенный образец): 1 – покрытие; 2 – клей

Образец получают приклеиванием металлической пластины *B* к поверхности покрытия с основным металлом *A*. Во время испытания определяют максимальное усилие, при котором происходит отделение покрытия от основного металла. Путём деления значения этого усилия на площадь приклеивания определяют прочность покрытия на сдвиг. Необходимо следить за тем, чтобы в процессе действия сдвигающей нагрузки на основной металл и металлическую пластину в рабочей зоне образца возникали чистые напряжения среза.

Прочность сцепления покрытия определяют также путём *испытания на сдвиг* по схеме, показанной на рис. 10.12.

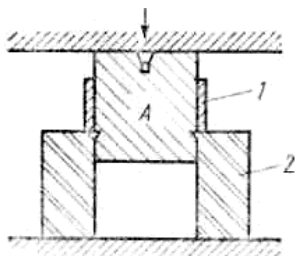


Рис. 10.12. Испытание на прочность сцепления покрытия при сдвиге (цилиндрический образец): 1 – покрытие; 2 – матрица

На центральную часть поверхности цилиндрического образца *A* (основного металла) напыляют исследуемое покрытие. Образец без покрытия входит по скользящей посадке в матрицу. Затем образец с покрытием устанавливают в матрице таким образом, чтобы покрытие опиралось на торцовую поверхность матрицы. Размеры цилиндрического образца и покрытия показаны на рис. 10.13. Прочность сцепления при сдвиге для такого образца определяют как отношение усилия срезающей нагрузки к площади цилиндрической поверхности, на которую напылено покрытие.

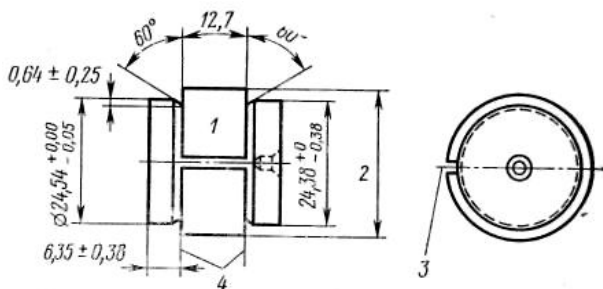


Рис. 10.13. Размеры образца для испытания на прочность сцепления при сдвиге:

- 1 – покрытие; 2 – 29,36 мм после напыления и $28,35 \pm 0,13$ мм после чистовой обработки; 3 – вырез 0,76 мм;
4 – поверхности, параллельные друг другу перпендикулярные оси образца

Упрощённые способы испытаний:

1. *Испытание на изгиб.* После напыления покрытия на плоский образец его изгибают и определяют угол изгиба в момент возникновения трещин в покрытии.
2. *Испытание царапанием.* Этот способ используют для оценки прочности сцепления покрытия из металлов с низкой твёрдостью. На покрытии специальным резцом, перпендикулярно расположенным к поверхности основы, наносят две параллельные царапины таким образом, чтобы полностью прорезать покрытие. Прочность сцепления характеризуется расстоянием между этими канавками, при котором покрытие будет отделяться от основы.
3. *Испытание циклической ударной нагрузкой.* О прочности сцепления судят по числу ударов и степени отслоения покрытия после многократного сбрасывания шарика или бойка на данный участок поверхности образца.

4. *Испытание выдавливанием.* Этот наиболее применяемый на практике способ качественной оценки прочности сцепления и других свойств напылённых покрытий заключается во вдавлении стального шарика в поверхность плоского образца со стороны, противоположной покрытию, с последующим визуальным осмотром деформированной поверхности покрытия.

10.4.2. Износостойкость и фрикционные свойства напылённых покрытий

На рис. 10.14 представлена сравнительная характеристика износостойкости различных сплавов. Значения износа были получены при испытании образцов наждачной бумагой в течение 1 мин при скорости скольжения 8 м/с (давление 1,66 МПа). Наибольшую величину износа показала низкоуглеродистая сталь, а наименьшую – сплав колмоной № 6.

На рис. 10.15 показан относительный износ различных покрытий. Представленные данные основаны на результатах испытаний на абразивный износ в среде абразивного шлама. Наиболее высокую износостойкость показывает покрытие из механической смеси карбида вольфрама с кобальтом (17%), полученное плазменным напылением.

Фрикционные свойства напылённых покрытий играют важную роль в повышении износостойкости деталей и механизмов машин. Пористая поверхность напылённых покрытий, обладая способностью к удержанию смазочного материала на поверхности, обеспечивает повышенную износостойкость.

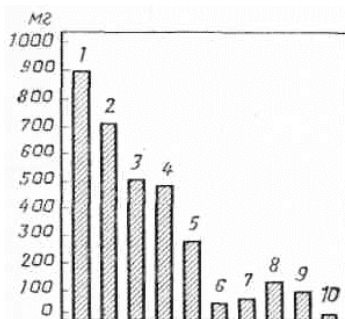


Рис. 10.14. Влияние износа (мг) как характеристики износостойкости различных сплавов: 1 – низкоуглеродистая сталь; 2 – коррозионно-стойкая сталь типа 18-8, содержащая молибден; 3 – хромомолибденовая сталь; 4 – стеллит № 66; 5 – стеллит № 33; 6 – стеллит № 11; 7 – сплав на хромово-никелевой основе; 8 – колмоной № 4; 9 – колмоной № 5; 10 – колмоной № 6

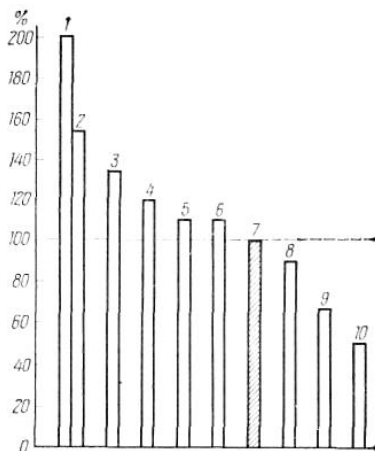


Рис. 10.15. Относительный износ (%) для различных покрытий:
 1 – сплав карбида вольфрама с кобальтом (17%), плазменное напыление в аргоне;
 2 – сплав карбида вольфрама с кобальтом (17%), плазменное напыление аргано-водородной плазмой; 3 – керамика системы $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$, плазменное напыление аргано-водородной плазмой; 4 – сплав карбида вольфрама с кобальтом (50%) с добавлением никеля, хрома, железа, бора, алюминид никеля, плазменное напыление аргано-водородной плазмой; 5 – особо тонкий порошок сплава оксида алюминия и оксида титана (13%), плазменное напыление аргано-водородной плазмой; 6 – сплав оксида алюминия с оксидом титана (13%), плазменное напыление аргано-водородной плазмой; 7 – твёрдое хромовое покрытие (электролитическое); 8 – композиционное покрытие системы $\text{Fe} - \text{Mo} - \text{Al} - \text{B}$, плазменное напыление в среде азота или аргона; 9 – смесь с содержанием 75% Mo , плазменное напыление аргано-водородной плазмой; 10 – композиционный материал в виде смеси сплава никеля (с хромом, бором и кремнием) с алюминиевым порошком, плакированным молибденом, газопламенное напыление

При испытании, например, стального закалённого вала через 2,5–3 ч после прекращения подачи смазочного масла происходит разрушение масляной плёнки, что приводит к резкому увеличению коэффициента трения и появлению заедания в подшипнике. Заедание же вала со стальным напылённым покрытием начинается в подшипнике только через 22,5 ч при постепенном повышении коэффициента трения. В случае использования смазочного масла с добавлением графита вал со стальным напылённым покрытием работает без заедания в течение 190 ч с момента прекращения подачи масла.

10.4.3. Жаростойкие и теплоизоляционные характеристики покрытий

На рис. 10.16 показаны результаты испытаний образцов на жаростойкость в плазменной струе.

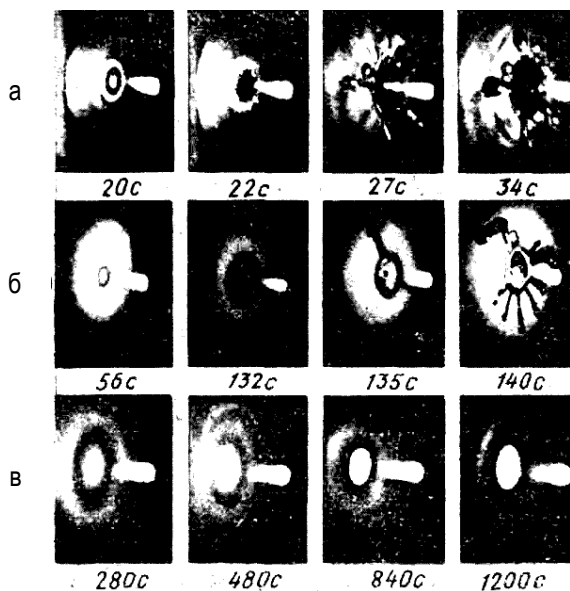


Рис. 10.16. Испытание различных образцов на жаростойкость в плазменной струе (цифрами обозначена продолжительность после начала нагрева):
 а – низкоуглеродистая сталь без покрытия; б – покрытие из оксида алюминия с диоксидом титана, нанесённое на нихромовый подслоя;
 в – покрытие из диоксида циркония, нанесённое на нихромовый подслоя

Покрытия из диоксида циркония, оксида алюминия с диоксидом циркония, напылённые плазменным методом на пластины из низкоуглеродистой стали толщиной 3 мм, были подвергнуты испытаниям на жаростойкость в плазменной струе, температура которой в точке нагрева составляла 2200–2300°C.

На рис. 10.16, *а* показан контрольный образец в виде пластины основного металла (низкоуглеродистой стали) без покрытия. Этот образец был прожжён насквозь через 34 с после начала нагрева. На рис. 10.16, *б* представлен образец с покрытием из оксида алюминия с диоксидом титана, нанесённым на подслоя нихрома толщиной 0,1 мм, а на рис. 10.16, *в* – образец с покрытием из диоксида циркония, также нанесённым на нихромовый подслоя. Образец с покрытием из оксида алюминия с диоксидом титана, для сквозного прожога которого потребовалось 140 с, показал более высокую жаростойкость по сравнению с контрольным образцом, а образец с покрытием из диоксида циркония не был прожжён после 1200 с нагрева.

В табл. 10.3 приведены результаты испытания на стойкость к термическому влиянию (циклическое повторение нагрева до 1000°C в те-

чение 5 мин с последующим охлаждением струёй сжатого воздуха в течение 5 мин) для керамических покрытий в сочетании с промежуточными слоями, наносимыми на основной металл плакированным порошком.

Таблица 10.3

Стойкость покрытий, напылённых оксидом алюминия и диоксидом циркония, к термическому влиянию (среднее число циклов до разрушения покрытия)

Напыляемый материал (толщина покрытия 0,3–0,4 мм)	Промежуточный слой, нанесённый плакированным порошком			
	Толщина подслоя системы Ni – Al		Толщина подслоя системы Ni – Cr	
	0,05 мм	0,1 мм	0,05 мм	0,1 мм
Al ₂ O ₃ +3,5% TiO ₂	3,8	4,2	3,7	7
Al ₂ O ₃ +20% Ni	1,3	2	6,2	4
Al ₂ O ₃ +20% Ni+5% Al	11	9,1	5	8,2
ZrO ₂ +5% CaO	9	18	7	19
ZrO ₂ +10% CaO	17	20	19	>20
ZrO ₂ +10% CaO+20% Al – Ni	18,3	19,5	-	-
ZrO ₂ +10% CaO+20% Ni – Cr	-	-	18	18

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие по курсу «Пластическое деформирование, наплавка и напыление для восстановления и упрочнения деталей машин» предназначено для студентов по подготовке инженеров по специальности «Металлургические машины и оборудование» по направлению «Технологические машины и оборудование», бакалавров по направлению «Технологические машины и оборудование», инженеров по специальности «Оборудование и технология сварочного производства» по направлению «Машиностроительные технологии и оборудование», бакалавров по профилю «Оборудование и технология сварочного производства» по направлению «Машиностроение». В нём рассмотрены вопросы истории развития теории и практики восстановления и упрочнения быстроизнашивающихся деталей оборудования. Даны представления об условиях и характере износа деталей оборудования и технологического инструмента, о видах изнашивания.

В пособии даны классификация и сущность способов восстановления и упрочнения рабочих поверхностей, показаны пути выбора состава и свойств упрочняющих покрытий, области применения различных покрытий.

Подробно изложены понятия о современных наплавочных материалах: о материалах для восстановительной и износостойкой наплавки,

о коррозионно-стойких наплавочных материалах. Представлены характеристики, свойства и области их применения.

Даны теоретические основы наплавки, понятия об основном металле, его свариваемости, доле основного металла в металле наплавки, о погонной энергии, скорости охлаждения, режимах наплавки и термообработке после наплавки.

Приведены общая характеристика технологии напыления, способы напыления и их сущность, сведения о напыляемых материалах. Изложены теоретические сведения о прочности сцепления покрытия с основным материалом и между собой, о плотности покрытия. Показана роль термообработки после нанесения покрытия напылением.

Представлена технология восстановления и упрочнения наплавкой и напылением деталей металлургического и горнорудного оборудования.

Показаны сущность, технические возможности, параметры и область применения упрочнения деталей машин поверхностным пластическим деформированием. Раскрыты суть формирования упрочнённого слоя деталей методом ППД, роль остаточных напряжений и связь состояния поверхности с эксплуатационными свойствами деталей.

Представлены оборудование и технология ППД методами обкатывания, выглаживания, ультразвуковой обработки, чеканки, упрочнения проволочным инструментом, обкатки дробью и др.

Показаны дефекты наплавки и напыления, причины их образования и методы обнаружения.

Все эти сведения дают студентам представление о восстановлении и упрочнении деталей машин и позволяют практически использовать полученные знания при изготовлении и ремонте любых деталей и механизмов машин различного назначения.

ВОПРОСЫ САМОКОНТРОЛЯ ДЛЯ СТУДЕНТОВ

1. История развития теории и практики восстановления и упрочнения быстроизнашивающихся деталей оборудования.
2. Классификация и сущность способов восстановления и упрочнения рабочих поверхностей деталей оборудования.
3. Виды изнашивания.
4. Классификация и сущность способов восстановления и упрочнения рабочих поверхностей.
5. Выбор состава и свойств упрочняющих покрытий.
6. Материалы для восстановительной и износостойкой наплавки.
7. Коррозионно-стойкие наплавочные материалы.
8. Выбор состава наплавленного металла в зависимости от вида изнашивания деталей оборудования.

9. Способы наплавки изношенных поверхностей.
10. Свариваемость основного металла.
11. Погонная энергия и скорость охлаждения при наплавке.
12. Регулирование доли основного металла в металле наплавки и определение толщины наплавленного слоя.
13. Наплавочные порошковые проволоки и ленты.
14. Технология наплавки углеродистых сталей.
15. Технология наплавки высоколегированных сталей.
16. Технология наплавки чугунов.
17. Технология наплавки меди и алюминия.
18. Электроды для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами.
19. Техника наплавки деталей типа тел вращения.
20. Понятие о режимах электродуговой наплавки.
21. Напряжения и деформации при наплавке.
22. Дефекты в наплавленном металле и способы их устранения.
23. Подготовка к наплавке и последующая термическая обработка.
24. Напыляемые материалы.
25. Газопламенное напыление.
26. Детонационное напыление.
27. Плазменное напыление.
28. Электродуговая металлизация.
29. Способы и температура напыляемого материала.
30. Прочность сцепления покрытия с основным материалом.
31. Термообработка после нанесения покрытия.
32. Способы повышения прочности сцепления и плотности напыляемого покрытия.
33. Дефекты в напылённом металле и способы их устранения.
34. Упрочнение рабочих поверхностей деталей методом поверхностного пластического деформирования.
35. Остаточные напряжения. Связь состояния поверхности с эксплуатационными свойствами деталей.
36. Оборудование и технология ППД методом обкатывания.
37. Оборудование и технология ППД методом выглаживания.
38. Оборудование и технология ППД методом ультразвуковой обработки.
39. Оборудование и технология ППД методом чеканки.
40. Оборудование и технология ППД методом упрочнения проволочным инструментом.
41. Оборудование и технология ППД методом обработки дробью.
42. Нанесение покрытий методом плакирования гибким инструментом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гребенник В.М., Гордиенко А.В., Цапко В.К. Повышение надёжности металлургического оборудования: справочник. – М.: Металлургия, 1988. – 688 с.
2. Хасуи А., Мorigаки О. Наплавка и напыление / пер. с яп. В.Н. Попова; под ред. В.С. Стёпина, Н.Г. Шестёркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.: ил.
3. Кащенко Ф.Д., Оншин Н.В. Восстановление и упрочнение деталей машин и механизмов. Лабораторный практикум: учеб. пособие. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – 57 с.
4. Сидлин З.А. Производство электродов для ручной дуговой сварки. – Киев: Экотехнология, 2009. – 464 с.
5. Жизняков С.Н., Сидлин З.А.. Ручная дуговая сварка. Материалы. Оборудование. Технология. – М.: ЦТТ ИЭС им. Е.О. Патона, 2007. – 360 с.
6. Разиков М.И., Толстов И.А. Справочник мастера наплавочного участка. – М.: Машиностроение, 1966. – 200 с.
7. Сварка. Резка. Контроль: справочник. / под общ. ред. Н.П. Алёшина, Г.Г. Чернышова. В 2 т. – М.: Машиностроение, 2004.
8. Упрочняющие и восстанавливающие покрытия / А.М. Цун, Г.С. Гун, В.В. Кривошапов и др. – Челябинск: Металлургия, Челябинское отд., 1991. – 160 с.
9. Сварочные материалы для дуговой сварки: справ. пособие. В 2 т. Т. 2. Сварочные проволоки и электроды / Н.Н. Потапов, Д.Н. Баранов, О.С. Каковкин и др. / под общ. ред. Н.Н. Потапова. – М.: Машиностроение, 1993. – 768 с.: ил.
10. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки: учебник для вузов. / А.И. Акулов, В.П. Алёхин, С.И. Ермаков и др.; под ред. А.И. Акулова. 2-е изд. испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 560 с.: ил.
11. Пацекин В.П., Рахимов К.З. Производство порошковой проволоки. – М.: Металлургия, 1979. – 80 с.
12. Д. Сефериан. Металлургия сварки / пер. с франц. И.Н. Ворновицкого, В.Д. Тарлинского. – М.: ГНТИ Машиностроительной литературы, 1963. – 348 с.
13. Фрумин И.И., Юзвенко Ю.А., Лейначук Е.И. Технология механизированной наплавки: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1964. – 306 с.: ил.

Учебное издание

МИХАЙЛИЦЫН Сергей Васильевич
БЕЛЯЕВ Александр Иванович

**Пластическое деформирование, наплавка,
напыление и плакирование для восстановления
и упрочнения деталей машин**

Учебное пособие

Редактор Т.А. Колесникова
Компьютерная верстка Л.М. Неद्याлковой

Подписано в печать 27.09.2013. Рег. № 18-13. Формат 60x84/16. Бумага тип. № 1.
Плоская печать. Усл.печ.л. 11,25. Тираж 100 экз. Заказ 544



Издательский центр ФГБОУ ВПО «МГТУ»
455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38
Полиграфический участок ФГБОУ ВПО «МГТУ»