

3 МАТЕРИАЛЫ

3.1 Общая характеристика материалов

Материал (ГОСТ 3.1109-82) – это исходный предмет труда, потребляемый для изготовления изделия. Материал делят на основной и вспомогательный.

Основной материал – это материал исходной заготовки. К основному материалу относят также материал, масса которого входит в массу изделия при выполнении технологического процесса (например, материал наплавочного электрода, припоя). **Вспомогательный материал** расходуется дополнительно к основному материалу при выполнении технологического процесса. Вспомогательными материалами считаются материалы, расходуемые при нанесении покрытий, пропитке, сварке (например, аргон), пайке (например, канифоль), закалке и т.д. Составы вспомогательных материалов, применяемых в различных процессах нанесения покрытий, будут приведены в соответствующих разделах.

Основной материал, применяемый при восстановлении деталей, претерпевает существенные изменения. В результате технологических воздействий при формировании покрытия изменяются свойства, а в ряде случаев и химический состав материала. Поэтому различают материалы, применяемые для восстановления деталей и полученные покрытия на этих деталях.

Материалы для восстановления деталей обладают двумя группами свойств: технологических и эксплуатационных. **Технологические свойства** материала включают свойства, обеспечивающие качественное нанесение покрытия при принятой технологии. Особенности способа нанесения покрытия определяют требования к технологическим свойствам материалов (табл. 3.2). Например, при электродуговой наплавке важными являются сварочно-технологические свойства наплавочных электродов – свариваемость, устойчивость горения дуги и разрывная длина и др. Для процессов газопорошковой наплавки и напыления большое значение имеет текучесть исходного порошка. В случае газотермического напыления покрытий существенное значение имеют теплопроводность, теплоемкость, а также температура плавления материала.

Под **эксплуатационными свойствами** материала понимают свойства нанесенного и обработанного на детали покрытия, обеспечивающие требуемый срок эксплуатации детали в заданных условиях.

Классификация материалов состоит в разделении их множества на непересекающиеся подмножества по их сходству в соответствии с принятыми методами. Традиционно материалы для восстановления классифицируют по следующим основным признакам: виду материала, химическому составу, назначению, методам получения покрытий. Существенным признаком классификации является структура покрытия, так как она определяет эксплуатационные свойства покрытия, а, следовательно, работоспособность и долговечность восстановленной детали.

В общем случае структура восстановленного слоя может быть гомогенной и композиционной. **Гомогенные покрытия** представляют собой однофазную систему. Это могут быть боридные фазы, полученные в результате химико-термической обработки, слои твердого раствора хрома, гальванически осажденного на восстанавливаемую поверхность, однородное керамическое или полимерное покрытие и т.д. Гомогенные покрытия находят широкое применение в ремонтном производстве. Их высокая однородность обуславливает высокую химическую стойкость. Ряд гомогенных покрытий, например напыленные керамические покрытия и диффузионные слои, имеют очень высокую твердость и обеспечивают высокую износостойкость.

Широкое распространение в практике восстановления деталей получили материалы, обеспечивающие формирование композиционных покрытий. **Композиционные покрытия** представляют собой гетерофазные системы, состоящие из двух или более фаз, разделенных границей раздела и отличающихся по своему химическому составу и свойствам.

В большинстве случаев фазы композиции различны по геометрическому признаку. Одна из фаз, обладающая непрерывностью по всему объему слоя, является матрицей (матричной фазой). Фаза, являющаяся разделенной на отдельные фрагменты в объеме композиции, является армирующей или упрочняющей. Наиболее часто роль матричной фазы выполняют твердые растворы металлов, а упрочняющими фазами являются выпокрытий.

Существуют два основных пути получения композиционной структуры покрытий: кристаллизация из легированного, многокомпонентного расплава и спекание компонентов без их полного расплавления и гомогенизации расплава (рис. 3.2). При кристаллизации из расплава формируется близкая к равновесной гетерогенная структура. Наибольшее распространение получили гетерогенные эвтектические наплавленные слои, содержащие эвтектику и избыточные фазы (рис. 3.3). Эффективным приемом получения гетерогенной структуры является термическая обработка наплавки. Происходящее при этом дисперсионное твердение (выделение вторичных высокотвердых фаз) дополнительно упрочняет наплавленный слой.

В случае спекания порошковых смесей или композиционных порошков, гетерогенная структура покрытия формируется вследствие полного или частичного сохранения исходной структуры порошковых частиц. Такие покрытия получают газотермическим напылением, электроконтактной приваркой, а так же гальваническим осаждением материалов. Возможности конструирования этих покрытий с различным сочетанием упрочняющих и матричных фаз значительной шире, чем у слоев, получаемых кристаллизацией из расплава. Создание композиционного покрытия базируется на основе сочетания в объеме покрытия материалов различных классов, обладающих различными исходными свойствами (металл, керамика, поли-

мер). Природа исходных компонентов, их фазовое состояние и соотношение, состояние границы раздела фаз и создание заданной микро- и макро-структуры определяют свойства композиционного покрытия.

Матрица материала композиционного покрытия может быть металлической, полимерной или керамической. Матрица придает покрытию монолитность, связывает его с основой детали, обеспечивает передачу и перераспределение нагрузки по объему покрытия, защищает армирующие элементы от внешних воздействий. Тип матрицы непосредственно определяет технологию получения композиционного покрытия, его термическую и коррозионную стойкость, электрические и теплозащитные свойства, старение и другие важнейшие характеристики покрытия в целом.

Большой интерес представляют материалы и покрытия системы металл-полимер, обладающие комплексом свойств, которыми обладают как металлы, так и полимеры. Как известно, металлические материалы обладают большой теплопроводностью и высокой прочностью, но уступают по антифрикционным свойствам, коррозионной стойкости, упругости многим полимерным материалам. В свою очередь, полимеры обладают небольшой плотностью и значительной эластичностью, лучшими антифрикционными свойствами, легко обрабатываются, но имеют очень низкие электро- и теплопроводность, невысокую контактную прочность, малое сопротивление срезу, склонность к ползучести и др.

3.2. Выбор материалов для восстановления деталей

Восстановление изношенной поверхности детали предполагает нанесение покрытия, основные эксплуатационные свойства которого близки к свойствам изношенного слоя. Формирование на изношенной поверхности покрытия, полностью идентичного по химическому составу, структуре и свойствам изношенному слою, является, как правило, технически сложной и экономически нецелесообразной задачей. Поэтому нанесенные покрытия значительно отличаются от металла изношенного слоя.

При выборе материала для защитного покрытия руководствуются следующей исходной информацией:

- воздействию каких видов изнашивания подвержена деталь?
- из какого материала изготовлена деталь?
- какой технологический процесс предпочтителен?
- каковы свойства восстановленной поверхности?
- какова допустимая стоимость восстановления?

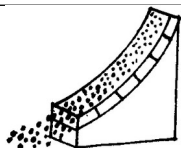
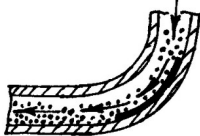
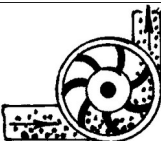
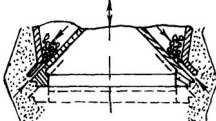
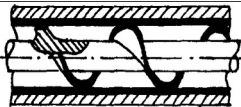
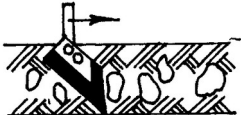
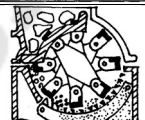
Определяющими являются эксплуатационные свойства поверхностного слоя детали, которые в свою очередь зависят от условий эксплуатации и характера разрушения. **Условия работы** восстанавливаемых и упрочняемых деталей разнообразны (табл. 3.3).

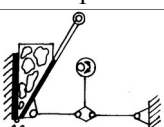
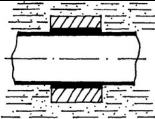
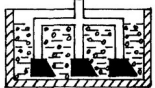
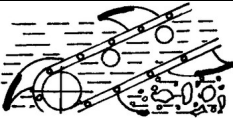
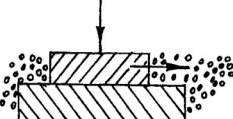
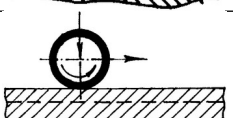
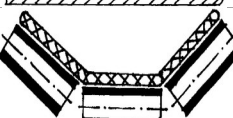
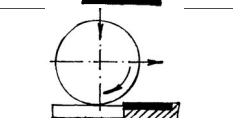
Для обеспечения высокой стойкости против разрушения при различных видах изнашивания, наплавленный металл по структуре и свойствам должен отвечать требуемым свойствам. Свойства материала определяются

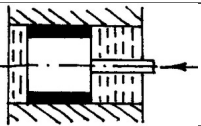
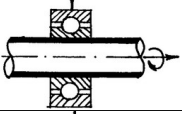
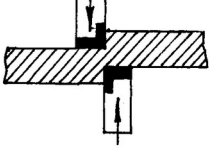
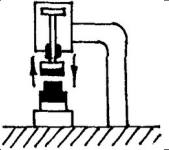
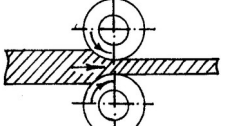
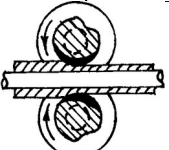
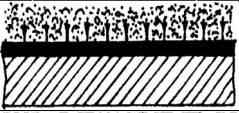
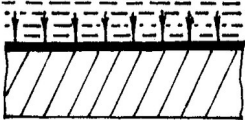
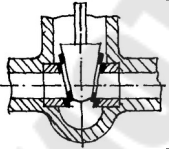
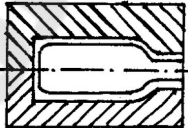
химическим составом и структурой. Ниже приведена краткая характеристика основных *легирующих элементов*, применяемых в сплавах для восстановления и упрочнения деталей.

Бор. Имея малый атомный радиус (0,09 нм), бор, однако, мало растворим в большинстве металлов, применяемых для восстановления деталей (Cr, Fe, Co, Ni, Cu, W) При легировании бором этих металлов образуются высокотвердые бориды Me_xB_y , которые способствуют резкому повышению твердости сплава. Высокая микротвердость боридов (12 000...37 000 МПа) и малая растворимость бора в металлах обеспечивают значительное повышение твердости сплава. Борсодержащие покрытия имеют высокую износостойкость. Характерной их особенностью является образование в условиях трения скольжения с большими удельными нагрузками вторичных борсодержащих структур оксидного типа, выполняющих роль смазки и снижающих силы трения и интенсивность изнашивания деталей пары трения. Наряду с повышением твердости бор сильно охрупчивает сплавы. Это обусловлено хрупкостью боридов и образующихся эвтектиче-

3.3. Характерные условия работы восстанавливаемых и упрочняемых деталей

Схема	Ин-	Контртело	Вид изнашивания. Условия эксплуатации	Упрочняемые и восстанавливаемые детали
1	2	3	4	5
	1	Кварцевый песок, дробленая порода	Абразивное. Низкое давление	Детали облицовки бункеров, пресс-формы для кирпича
	2	Гранулированный шлак, стальная дробь	Газоабразивное	Трубопроводы дробеструйных и пескоструйных устройств
	3	Формовочная земля, песок	Газоабразивное	Пескометы, детали формовочных машин, лопатки дробемеров
	4	Кварцевый песок, дробленая сухая порода	Газоабразивное	Клыки роторного экскаватора, режущие зубья, рабочие детали брикетных прессов
	5	Сталь. При открытии затвора – агломерат, шихта, колошниковая пыль	Газоабразивное. Температура газа до 800°C	Большой конус и чаша засыпного аппарата доменной печи
	6	Пластмассы с наполнителями, сырой синтетический каучук	Абразивное и коррозионно-механическое. Температура до 400°C, агрессивные растворы	Шнеки и гильзы экструдеров и отжимных машин.
	7	Почва различных типов (чернозем, суглинок и др.)	Абразивное	Лемехи плугов, лапы культиваторов, диски борон
	8	Каменистая почва		
	9	Песок, замерший грунт, валуны, скальные породы	Абразивное. Давление до 50 МПа	Зубья и ковши экскаваторов, детали дробилок
	10	Стальная дробь электрокорунд	Абразивное с ударами	Лопатки дробемеров, отбойные листы, лопатки дымососов и эксгаустеров
	11	Уголь, известняк и другие породы	Абразивное с ударами	Била молотковых дробилок и мельниц для размола угля
	12	Известняк, каолин и другие породы	Абразивное	Валки дробилок с шипами
	13	Уголь, известняк и другие породы	Абразивное с ударами	Колосники молотковых дробилок, детали шаровых мельниц, молотковых дробилок

1	2	3	4	5
	14	Руда, горные породы средней и высокой крепости	Абразивное с ударами. Давление до 50 МПа	Щеки дробилок, бандажи валковых дробилок
	15	Жидкая среда и твердые взвешенные зерна (песок и др.)	Гидроабразивное	Защитные втулки валов, детали насосов и гидротурбин
	16	Песок и гравий, молотые минералы	Гидроабразивное	Мешалки и другие детали смесителей, земснарядов
	17	Песок, гравий и камни	Гидроабразивное	Детали морских землечерпалок, грейдеров и экскаваторов
	18	Конструкционная сталь и абразив	Абразивное с ударами	Детали гусеничных машин, цепей экскаваторов, звездочки ковшовых элеваторов
	19	Конструкционная сталь	Механическое. Трение без смазки или с граничной смазкой	Направляющие, измерительный инструмент
	20	Мягкая сталь, нержавеющая сталь, алюминий	Механическое. Давление более 50 МПа, удары, скольжение	Гибочные штампы, вытяжные штампы холодной штамповки
	21	Сталь	Механическое	Рабочие колеса кранов, колесные пары и бандажи
	22	Резина и синтетическая ткань	Абразивное	Ролики транспортных лент
	23	Сталь	Механическое. Сильные удары, вызывающие смятие, а также абразивное изнашивание	Железнодорожные крестовины, звенья гусениц
	24	Конструкционная сталь	Механическое. Граничная смазка, контактные напряжения	Зубья шестерен
	25	Конструкционная сталь	То же, граничная смазка наличие продуктов изнашивания	Уплотнения валов, узлы трения скольжения
	26	Бронза, антифрикционный сплав	То же, пленка смазки	Валы, оси в узлах трения
	27	Сталь	Гидроэрозионное	Концевые валы судов, подшипники скольжения гидравлических приводов
	28	Вода	Кавитационное	Лопасты гидротурбин, лопасти судовых винтов

1	2	3	4	5
	29	Сталь, бронза	Кавитационное	Плунжеры гидравлических прессов
	30	Сталь	Механическое.	Посадочные места
	31	Сталь, цветные металлы	Механическое. Давление более 50 МПа, удары, скольжение	Ножи ножниц холодной резки, обрезные штампы холодной штамповки
	32	Сталь, нагретая до 1100°	Коррозионно-механическое. Давление более 50 МПа, удары, скольжение, окислительная атмосфера, резкое охлаждение	Ножи ножниц горячей резки, штампы горячей штамповки
	33	Горячий металл (сталь, сплавы никеля, меди и др.)	Коррозионно-механическое. Окислительная атмосфера, удары	Детали ковочных молотов и прессов, ковочные штампы горячей штамповки
	34	Горячий металл (листовой и сортовой)	То же. Циклический нагрев и резкое охлаждение	Валки горячей прокатки листа и сортового проката
	35	Горячий металл – трубы	То же	Валки пильгерстанов ковочных машин, штампы горячей штамповки
	36	Горячие газы	Окислительное. Окислительная атмосфера, высокая температура	Детали облицовки печей, держатели
	37	Жидкие и газообразные агрессивные среды, вызывающие коррозию	Гидро- и газоабразивное	Днища котлов, стенки резервуаров, трубы (внутренние поверхности)
	38	Зола, песок, уголь	Газоабразивное. Температура до 500°С	Паро-зольные вентили, седла продувочных клапанов
	39	Пар высоких параметров	Эрозионное и коррозионно-механическое. Температура до 585°С, давление до 12 МПа	Трубопроводные вентили, паровые клапаны и др.
	40	Жаростойкий чугун или сплав, выхлопные газы	Эрозионное и коррозионно-механическое. Температура до 850°С, удары	Выхлопные клапаны двигателей внутреннего сгорания
	41	Расплавленное стекло	Коррозионно-механическое	Формы для прессования стекла

1	2	3	4	5
	42	Порода, сухая и влажная	Абразивное с ударами	Зубья шарошек буровых долот, замки и муфты буровых труб, горный и почвообрабатывающий инструмент

ских структур. Охрупчивание особенно сильно при совместном легировании бором и углеродом. Бор является относительно дорогим легирующим элементом. В покрытиях, работающих с ударными нагрузками, ограничивают содержание бора. Образование легкоплавких эвтектик при легировании бором повышает технологические свойства этих сплавов. Особенно это важно для самофлюсующихся порошков. В них бор является основным легирующим элементом.

Углерод. Большинство наплавочных сплавов в той или иной степени легированы углеродом. Такое широкое применение углерода обусловлено его минимальной стоимостью и высоким упрочняющим действием. Он является основным карбидообразующим элементом. При доэвтектоидном содержании углерода (менее 0,8%) формируется покрытие, обладающее высокой ударостойкостью при сравнительно хорошей износостойкости. При большем содержании углерода при наличии карбидообразующих металлов существенно возрастает износостойкость, особенно абразивная, однако стойкость к ударным нагрузкам снижается. Углерод резко снижает коррозионную стойкость покрытий. Поэтому для коррозионностойких покрытий содержание углерода уменьшают. Содержание углерода более 1,2% применяется редко, в том случае, когда необходима большая твердость. На технологические свойства сплавов углерод оказывает отрицательное влияние, ухудшает свариваемость и увеличивает склонность к трещинам.

Хром. Находит очень широкое применение в наплавочных сплавах. Следует отметить, что сплавы системы Fe-Cr практического значения как наплавочные не имеют из-за образования хрупкой σ -фазы FeCr и относительно небольшого упрочнения. Наибольшее влияние хрома на эксплуатационные свойства износостойких сплавов проявляется при наличии углерода. Высокий уровень эксплуатационных свойств сплавов Fe-Cr-C обусловлен количеством, размерами, морфологией и микротвердостью карбидов и металлической основы. В наплавленном металле хром может образовывать следующие карбиды: орторомбический Cr_3C_2 , тригональный Cr_7C_3 и кубический Cr_{23}C_6 . Карбид Cr_3C_2 в сплавах Fe-Cr-C встречается редко. Как правило, при содержании хрома менее 7% образуются карбиды цементитного типа, легированные хромом. В цементите может растворяться до 20% хрома. При содержании хрома свыше 8% в чугуне с 3% C количество карбидов цементитного типа уменьшается за счет образования карбидов Cr_7C_3 и Cr_{23}C_6 . Именно эти карбиды являются предпочтительными в износостойких сплавах. Основным путем регулирования количества и типа карбидов в износостойких сплавах – выдерживание требуемого соотноше-

ния Cr/C в сплаве. Экономические издержки такого подхода привели к интенсивной разработке экономно-легированных износостойких сплавов. В этих сплавах требуемое количество, тип и морфология карбидных фаз формируются за счет рационального легирования более сильными карбидообразующими элементами, такими как V, Ti, W, Mo. В этом случае образуются преимущественно карбиды MC и M₇C₃, способствующие повышению эксплуатационных характеристик сплавов. В сплавах с дефицитом по углероду, а также в легированных бором, могут присутствовать дополнительно карбиды M₂₃C₆. Указанные сплавы обладают высокой твердостью и абразивной износостойкостью. Эффективным приемом регулирования количества, морфологии и типа карбидной фазы в хромистых износостойких сплавах является термическая обработка. Однако для покрытий она находит ограниченное применение. Хром повышает коррозионную стойкость и окислостойкость покрытий. С увеличением количества хрома ухудшается свариваемость, повышается вероятность образования трещин в покрытиях.

Никель. Находит широкое применение в сплавах для защитных покрытий. Никель неограниченно растворим в железе и является сильным аустенизирующим элементом. Собственных высокотвердых фаз в сплавах железа никель не образует. Его влияние заключается в существенном повышении стойкости покрытий к ударным нагрузкам. С увеличением никеля повышается вязкость сплава практически без ущерба для износостойкости. Никель – дорогой легирующий элемент, поэтому его количество в износостойких сплавах на основе железа ограничивают. Исключение составляют сплавы для коррозионно-стойких покрытий. Легирование никелем повышает свариваемость сплавов, снижая склонность к трещинам. В самофлюсующихся порошках никель применяют в качестве основы сплава. В этом случае достигаются высокие коррозионная стойкость, износостойкость и технологичность нанесения покрытия благодаря образованию в системе Ni–Cr–B–Si гетерогенной структуры эвтектического типа с низкой температурой плавления ($\leq 1000^\circ\text{C}$).

Кремний. В силу металлургических особенностей производства, кремний является постоянным спутником сплавов на основе железа, в том числе наплавочных. В Fe_α растворяется до 15% кремния. В системе Fe–Si образуется ряд силицидов: FeSi, FeSi₂, Fe₃Si₂, Fe₅Si₃. Кремнийсодержащие сплавы для износостойких покрытий, как правило, содержат углерод, хром и ряд других легирующих элементов. Кремний не образует самостоятельных карбидов, является ферритизирующим элементом, он снижает количество остаточного аустенита. В отдельных случаях возможна графитизация наплавленного слоя. Легирование кремнием наплавочных сплавов упрочняет ферритную матрицу и способствует увеличению количества карбидов M₇C₃. По мере увеличения содержания в сплавах кремния, количество его в матрице резко повышается. Добавка даже 4% кремния приводит к увеличению его содержания в матрице выше 10%, так как ни первичные ни эв-

тектические карбиды M_7C_3 не растворяют кремний. При увеличении содержания кремния относительное количество хрома в твердом растворе падает на 55–70%. Все это приводит к повышению твердости и износостойкости наплавки. В отдельных случаях зафиксировано образование карбосилицидной фазы. Кремний повышает коррозионную стойкость железоуглеродистых сплавов. Находят применение коррозионно-стойкие сплавы с содержанием кремния более 12%. Однако механические и триботехнические свойства указанных сплавов низки. Высококремнистый наплавленный слой склонен к образованию пор и имеет низкую трещиностойкость.

Марганец. Карбидообразующая способность марганца несколько выше, чем у железа, но, как правило, собственных карбидов в стали он не образует, растворяясь в цементите. Однако, при большом содержании марганца, например, в ферромарганце, образуются карбиды марганца Mn_7C_7 , Mn_7C_3 . Значение марганца для износостойких сплавов обусловлено его аустенизирующей способностью и стабилизацией карбидов. Следует отметить также, что легированный марганцем карбид $(FeMn)_3C$ менее хрупок, чем цементит. По стабилизирующему воздействию на аустенит марганец подобен никелю. Замена никеля марганцем значительно удешевляет сплав. Марганец подавляет превращение в бейнитной области, растягивает во времени превращение в перлитной области при одновременном интенсивном снижении температуры мартенситного превращения. Поэтому наплавленные слои, легированные марганцем, имеют в структуре значительное количество остаточного аустенита. Образующая при этом структура (остаточный аустенит, мартенсит, карбиды) обладает высокими эксплуатационными свойствами, особенно в условиях ударных нагрузок. Для сплавов Fe-Cr-Mn-C оптимальным является 2-4% Mn. Для получения мартенситно-аустенитных сплавов с небольшим содержанием остаточного аустенита рекомендовано ограничивать содержание марганца до 4%. Для получения чисто аустенитных сплавов необходимо более 5% Mn. Велик потенциал повышения эксплуатационных свойств марганцовистых наплавов за счет термической обработки. Обнаружен значительный эффект дисперсионного твердения – сфероидизация первичных и выпадение вторичных карбидов. Эффективным является легирование марганцем бористых наплавочных сплавов. В этом случае уменьшается количество хрупкого цементита за счет образования карбида $Fe_{0,4}Mn_{3,6}C$ на фоне боридов Fe_2B . Однако для аустенизации сплава и повышения его ударостойкости необходимо дополнительно легировать никелем. Увеличение количества аустенита при легировании марганцем не равноценно по эффекту, достигаемому за счет легирования никелем.

3.4. Физико-механические свойства высокотвердых фаз, применяемых в

материалах для восстановления деталей

Фаза	Микротвердость, МПа	Температура плавления, °C	Плотность, г/см ³	Модуль нормальной упругости, ГПа
------	------------------------	------------------------------	---------------------------------	-------------------------------------

(FeCr) ₃ C	9800-11000	1650	7,67	
Cr ₇ C ₃	13700-2400	1655	6,92	360
Cr ₂₃ C ₆	12250-22800	1550	6,97	380
Cr ₂ C ₃	13500-18000	1660	6,68	280
VC	30000	2810	5,36	270-430
TiC	24000-32000	3150	4,93	460
ZrC	28000	3420	6,57	350-420
WC	17400-22000	2720	15,6	610-720
Fe ₂ B	12900-16800	1410	7,2	
Fe ₃ (BC)	9000-12000	1650	7,67	
CrB ₂	20600-21000	2200	5,2	220
VB ₂	21000-27400	2400	5,28	~270
TiB	32000-33000	2980	4,45	455-540
W ₄ B	37000	2800	15,3	790
ZrB	22500-34000	3040	6,17	220-350
CrN	11000	~1500	6,1	330
VN	15000	2180	6,1	267
TiN	19000-20500	2950	5,43	340-616
ZrN	~15000	2950	7,1	~400
Al ₂ O ₃	20000-25400	2050	3,9	410
SiO ₂	11500	1720	2,65	73
TiO ₂		1850	4,24	280
ZrO ₂		2700	5,6	
Cr ₂ O ₃	29400	2300	5,21	405
CoAl		1630	6,03	
NiAl		1640	5,91	
B ₄ C	35600-49500	2350		460

Характеристика основных фазовых составляющих металлических покрытий состоит в следующем: феррит является наименее благоприятной фазовой составляющей основы сплава, т.к. он имеет невысокие твердость, износостойкость, вязкость и сопротивление разрушению. Он может находиться в наплавленном металле при наличии мартенсита и небольшого количества упрочняющей фазы. Наилучшей основой наплавленного металла является смесь аустенита с мартенситом. При этом в зависимости от наличия и энергии ударных составляющих при работе детали количество аустенита и мартенсита должно быть различным. Чем больше ударные нагрузки, тем больше должно быть аустенита. Желательно, чтобы мартенсит в этом случае был низкоуглеродистым, например, благодаря связыванию углерода карбидообразующими элементами. Количество и тип высокотвердых фаз влияют на износостойкость покрытий. увеличение содержания карбидов, боридов, нитридов значительно повышает твердость покрытия. Однако износостойкость при этом может не увеличиваться. Это обусловлено морфологией и физико-механическими свойствами высокотвердых фаз (табл. 3.4).

Разработаны рекомендации по выбору наплавочного сплава для износостойких покрытий (табл. 3.5). Указанный фазовый и химический со-

став наплавленного металла являются рекомендуемыми. Доступные наплавочные материалы их не всегда воспроизводят. Однако приведенные в таблице данные позволяют ориентироваться в выборе наплавочных материалов для различных условий работы, а также руководствоваться при разработке новых материалов.

Рекомендации по рациональному применению выпускаемых материалов в процессах восстановления и упрочнения деталей активно разрабатывают ведущие зарубежные фирмы.

3.3. Металлическая проволока и лента

Стальная сварочная проволока согласно ГОСТ 2246-70 делится на низкоуглеродистую, легированную и высоколегированную. Предусмотрено 77 марок проволок диаметром от 0,3 мм до 12 мм. Проволоку применяют для наплавки, электроконтактной приварки и газотермического напыления.

Условное обозначение марки сварочной проволоки включает в себя последовательно:

- число, указывающее диаметр проволоки в мм;
- индекс Св (сварочная) или Нп (наплавочная);
- следующее за индексом число, показывающее содержание углерода в сотых долях процента;
- буквенно-цифровое обозначение легирующих элементов; степень чистоты материала; другие сведения. При содержании легирующих элементов менее 1% ставят только букву этого элемента, при их содержании более одного процента после буквенного обозначения элемента приводят цифру, указывающую содержание в целых единицах процентов. Приняты обозначения: А – азот (только в высоколегированных сплавах), Б – ниобий, В – вольфрам, Г – марганец, Д – медь, М – молибден, Н – никель, К – кобальт, Р – бор, С – кремний, Т – титан, Ф – ванадий, Х – хром, Ц – цирконий, Ю – алюминий. Буква А после обозначения низкоуглеродистых и легированных проволок указывает на повышенную чистоту материала по содержанию серы и фосфора, буква АА показывают пониженное содержание серы и фосфора по сравнению с проволокой А;
- затем через дефис указывают способ плавления: Ш – полученная из стали электрошлаковым переплавом, ВД – выплавленная вакуумно-дуговым переплавом, ВИ – выплавленная в вакуумно-индукционной печи, О – омедненная, Э – для изготовления электродов,
- через дефис: Д – холоднодеформированная (тянутая); Г – горячедеформированная, КР – круглого сечения, БТ – мотки, бухты, КТ – катушки, БР – барабаны.

Пример. Обозначение сварочной проволоки 2,5Св08Х3Г2СМФА-ВИ-Э-О содержит следующие сведения. Стальная сварочная проволока диаметром 2,5 мм содержит углерода 0,08%, хрома 3%, марганца 2%, кремния, молибдена и ванадия – до 1% каждого, характеризуется повы-

шенной чистотой по содержанию серы и фосфора, выплавлена в вакуумно-индукционной печи, предназначена для изготовления электродов, омедненная.

Для сварки алюминия и его сплавов по ГОСТ 7871-75 предусмотрено 25 различных видов проволоки диаметром 0,8...12,5 мм. Для сварки меди и ее сплавов служат проволоки по ГОСТ 16130-80 из меди (М1, М1р, М2р, Мср1, МНЖ5-1, МНЖКТ5-1-0-0,2-0,2 и др.) бронзы (БрКМц3-1, БрОЦ4-3, БрАМЦ9-2 и др.), латуни (Л63, ЛО60-1, ЛК62-05, ЛМц58-2, ЛОК52-1-0,3 и др.)

Для механизированной наплавки по ГОСТ 10543-98 выпускается специальная **наплавочная проволока** типа Нп диаметром 0,3; 0,5; 0,8; 1,2; 1,4; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,5 и 8,0 мм. Наплавочная проволока разделена на три группы: из углеродистых сталей; из легированных сталей и высоколегированных сталей (табл. 3.7). На практике в наплавочных работах находят также применение стандартная сварочная проволока по ГОСТ 2246-70 и проволока, предназначенная для изготовления пружин по ГОСТ 9389-75.

Пример. Обозначение сварочной проволоки 2,5Св08Х3Г2СМФА-ВИ-Э-О содержит следующие сведения. Стальная сварочная проволока диаметром 2,5 мм содержит углерода 0,08%, хрома 3%, марганца 2%, кремния, молибдена и ванадия — до 1% каждого, характеризуется повышенной чистотой по содержанию серы и фосфора, выплавлена в вакуумно-индукционной печи, предназначена для изготовления электродов, омедненная.

Для сварки алюминия и его сплавов по ГОСТ 7871-75 предусмотрено 25 различных видов проволоки диаметром 0,8...12,5 мм. Для сварки меди и ее сплавов служат проволоки по ГОСТ 16130-80 из меди (М1, М1р, М2р, Мср1, МНЖ5-1, МНЖКТ5-1-0-0,2-0,2 и др.) бронзы (БрКМц3-1, БрОЦ4-3, БрАМЦ9-2 и др.), латуни (Л63, ЛО60-1, ЛК62-05, ЛМц58-2, ЛОК52-1-0,3 и др.)

Проволока для напыления. Для газотермических покрытий применяют как сварочную проволоку, так и наплавочную (Св-08Г2С, Св-07Х19Н9ТЮ, Нп-65Г, Нп-40Х13 и др.). За рубежом ряд фирм выпускают специальную проволоку для газотермических покрытий. Фирма "Metco" (в настоящее время "Sulzer Metco") длительное время занимается разработкой технологий и проволочных материалов для газотермических покрытий (табл. 3.8).

Стальная наплавочная лента представляет собой полосу толщиной 0,4...0,6 мм и шириной 30...100 мм. Применение ленты обеспечивает широкослойную наплавку с высокой производительностью и небольшой глубиной проплавления основного материала. Материалом холоднокатанной ленты служат конструкционные, инструментальные, пружинные или нержавеющие стали с невысоким содержанием углерода. Такую ленту применяют, как правило, при наплавке под флюсом. Однако лента из компакт-

ного материала не удовлетворяет разнообразным требованиям к наплавке, поэтому разработаны и применяют спеченные и порошковые ленты.

3.4. Штучные электроды и прутки

Электрод сварочный – это стержень, по которому подводится к детали электрический ток во время сварки, наплавки или резки. Электроды бывают плавящиеся и неплавящиеся. Неплавящийся электрод изготавливают из электротехнического, реже синтетического, графита или вольфрама. Основой плавящегося электрода является сварочная проволока, материал которой в процессе сварки переносится в виде валика на деталь.

Плавящиеся электроды классифицируются по видам проволочного материала и электродного покрытия.

Электроды классифицируют:

- по назначению (ГОСТ 9466-75);
- по типам (ГОСТ 9467-75, 10051-75 и 10052-75);
- по маркам;
- по толщине покрытия (ГОСТ 9466-75);
- по группам;
- по видам покрытий.

Электроды для сварки обозначают буквой Э с двухцифровым числом через дефис. Число показывает прочность сварочного шва на растяжение. Электроды для наплавки обозначают буквами ЭН и числом, которое указывает гарантированную твердость наплавленного материала. Каждому типу электродов соответствует несколько их марок, различающихся видом и составом покрытий. По ГОСТ 10051-75 установлено 44 типа электродов.

Для сварки и наплавки деталей применяют электроды с покрытиями. По толщине покрытия (в зависимости от соотношения их наружного диаметра D к диаметру стального стержня d) электроды бывают с тонким – М ($D/d \leq 1,20$), средним – С ($D/d = 1,20...1,45$), толстым – Д ($D/d = 1,45...1,80$) и с особо толстым Г ($D/d \geq 1,80$) покрытиями.

Тонкие (стабилизирующие) покрытия электродов служат только для обеспечения устойчивого горения дуги. Их толщина равна 0,10...0,25 мм, а масса составляет 1...2 % от массы металлического стержня. Толстые (качественные) покрытия в отличие от стабилизирующих не только повышают устойчивость горения дуги, но и улучшают качество сварного шва.

Толстые качественные покрытия защитно-легирующего типа включают в себя такие составляющие:

- добавки, стабилизирующие процесс горения дуги, (сода, поташ, диоксид титана, мел, мрамор и др.)
- газообразующие добавки из органических соединений (крахмал, муку пищевую или древесную, декстрин) для создания среды, защищающей расплавленный металл от вредного влияния атмосферы;

- шлакообразующие добавки (титановый концентрат, марганцевую руду, полевой шпат, плавиковый шпат, кварц, гранит, мрамор, каолин и др.), которые очищают расплавленный металл и защищают его от вредного влияния атмосферы;

- раскисляющие и легирующие (ферромарганец, ферросилиций, ферротитан, алюминий и др.)

- связующие добавки (жидкое стекло, декстрин и др.).

Вид **электродного покрытия** обозначается индексом:

А – кислое покрытие, содержащее оксиды железа, марганца, кремния, иногда титана (ОММ-5, ОММ-5Ц, ЦМ-7, ЦМ-8 и др.). Сварку ведут на переменном или постоянном токе прямой или обратной полярности;

Б – основное покрытие, содержащее фтористый кальций (плавиковый шпат) и карбонат кальция (мрамор, мел). Это электроды марок УОНИ-13/45, УОНИ 13/55, ЦЛ-9, ОЗС-2, АНО-7 и АНО-8. Электроды применяют для сварки на постоянном токе обратной полярности. Вследствие малой склонности металла шва к образованию горячих и холодных трещин, электроды применяют и для сварки деталей с толстыми стенками;

Ц – целлюлозное покрытие, создающее газовую защиту дуги (ВСЦ-4, ВСЦ-4А, ОМА-2, ОЗС-1 и др.). Ими сваривают стали малой толщины на переменном токе обратной полярности;

Р – рутиловое покрытие (ОЗС-4, ОЗС-6, АНО-1, АНО-3, АНО-4, АНО-5, АНО-12 и др.). Основным компонентом покрытия – оксид титана. Электроды служат для сварки на переменном и постоянном токе прямой и обратной полярности. Достигается высокая устойчивость горения дуги во всех пространственных положениях. Поскольку в покрытие входит 2...8% органических веществ, то электроды хранят в сухом месте, а перед употреблением сушат в течение 1 ч при температуре 120...150°C;

АЦ, РБ и др. – смешанные покрытия;

П – прочие виды покрытий (АНО-6, АНО-10 и др.).

В зависимости от вида свариваемых материалов электроды делятся на группы: У – для сварки углеродистых сталей; Л – легированных конструкционных сталей; Т – легированных теплоустойчивых сталей; В – высоколегированных сталей с особыми свойствами; Н – для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами.

По допустимым пространственным положениям свариваемого шва электроды обозначают: 1 – для всех положений; 2 – для всех положений, кроме вертикального сверху вниз; 3 – для нижнего, горизонтального на вертикальной плоскости и вертикального снизу вверх; 4 – для нижнего.

По роду и полярности применяемого тока, а также по номинальному напряжению холостого тока источника питания сварочной дуги переменного тока электроды маркируются: 0 – только для постоянного тока обратной полярности; 1, 2 и 3 – для напряжения холостого хода переменного тока 50±5 В; 4, 5 и 6 – то же для напряжения 70±10 В; 7, 8 и 9 – то же для

напряжения 90 ± 5 В. Структура условного обозначения электродов приведена на рис. 3.4.

ПРИМЕР. ОБОЗНАЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОДА

Э - 46А - УОНИ - 13/45 - 3,0 - УД2

E432(5) - Б10

расшифровывается следующим образом. Э-46А (Э – электрод сварочный, 46 – минимальный гарантируемый предел прочности металла шва на растяжение, 460 МПа, А – гарантируется получение повышенных пластических свойств металла шва); УОНИ-13/45 – марка; 3,0 – диаметр стальной проволоки, мм; У – электроды для сварки углеродистых сталей; Д2 – с толстым покрытием второй группы; E432(5) – характеризует наплавленный металл шва, где 43 – временное сопротивление разрыву не менее 430 МПа, относительное удлинение не менее 2% и (5) – ударная вязкость не менее 34,5 Дж/см² при температуре минус 40°C; Б – основное покрытие; 1 – для сварки во всех пространственных положениях; 0 – на постоянном токе обратной полярности.

Наплавочные прутки. Прутки применяют в основном для газопламенной и аргонодуговой наплавки в качестве присадочных материалов без приложения к ним электрического напряжения. Прутки получают литьем. Их изготавливают диаметром 4, 6, 8, 10, 12, 14 и 16 мм и длиной 250, 300, 350, 400, 450 и 500 мм.

Литые прутки применяют также и для изготовления покрытых электродов для ручной дуговой наплавки (табл. 3.12), например, марки ГН-1 со стержнем из сплава “Сормайт” и ЦН-2 со стержнем из стеллита ВЗК.

3.5 Порошки

Промышленное применение порошковых сплавов для нанесения защитных покрытий развивается начиная с 40-х годов прошлого столетия, когда впервые покрытия были использованы для деталей военной техники. В настоящее время номенклатура порошковых материалов для наплавки и напыления весьма разнообразна. Она включает в себя металлические порошки, композиционные порошки и порошковые смеси, тугоплавкие соединения (рис. 3.6).

В таблице 3.14 приведен состав **порошков чистых металлов**, изготовленных в странах СНГ. В процессах восстановления и упрочнения деталей порошки чистых металлов находят ограниченное применение. Как правило, эти порошки обладают удовлетворительными технологическими свойствами и высокой стоимостью.

Распространенными порошковыми материалами являются **порошки сплавов**, получаемые распылением в защитной атмосфере расплава. В разное время НПО “Тулачермет” и Торезский завод наплавочных твердых сплавов выпускали порошки износостойких чугунов, инструментальных и конструкционных сталей, нержавеющей сталей и медных сплавов. Аналогичные порошки выпускают фирмы “Sulzer Metco”, “Plasma-Dain”, “Cas-

tolin", "Höganäs", "Kobe Steel", "Leybold-Heraeus GMBH", "Davy McKee", "Pow-drex" и др.

В таблице 3.15 представлены марки порошков высокоуглеродистых легированных сплавов. Эти наплавочные сплавы применяются для упрочнения и восстановления рабочих органов почвообрабатывающих машин, деталей систем гидравлических приводов и др. Они наносятся плазменной и индукционной наплавкой. Сплавы ПР-ХЗОГСП и ПР-ФМИ могут также наплавляться газопламенной горелкой с добавлением флюса в ее факел.

Самофлюсующиеся порошки получили наибольшее распространение в практике восстановительно-упрочняющих технологий. Особое преимущество материалов этого класса состоит в том, что качественное оплавление покрытия происходит без применения дополнительных флюсов или защитных сред. Химический состав сплавов обеспечивает пониженную температуру плавления, расплав хорошо смачивает наплавляемую поверхность, удаляет оксидные пленки, частично растворяет подложку, что в конечном итоге приводит к формированию высококачественного покрытия с минимальной пористостью, высокой прочностью сцепления с основой и ровной, гладкой поверхностью. Основными элементами, обеспечивающими самофлюсование сплава, являются бор и кремний. Эти элементы имеют высокое сродство к кислороду. При взаимодействии с оксидами они ведут себя как энергичные восстановители, образуя B_2O_3 и SiO_2 в виде стекловидного шлака на поверхности, защищая таким образом металл от окисления. Помимо флюсования В и Si улучшают жидкотекучесть и уменьшают поверхностное натяжение расплава. В настоящее время выпускают самофлюсующиеся порошки на основе кобальта, никеля и железа. Есть сведения о самофлюсующихся порошках на основе меди.

Порошки, предназначенные для нанесения защитных покрытий наплавкой и напылением с последующим оплавлением, являются специфическим продуктом порошковой металлургии. Технологические особенности метода нанесения покрытия обуславливают следующие требования к наплавочным порошкам:

1. Порошок должен иметь температуру плавления, значительно более низкую, чем материал детали. Как правило, для стальных деталей она составляет 950-1200°C. В этом случае не происходит пережога и оплавления материала детали.

2. Высокая наплавляемость порошка обусловленная способностью удалять оксидные пленки с подложки, хорошо смачивать ее и формировать беспористое (малопористое) покрытие.

3. Высокая текучесть порошка, для обеспечения бесперебойной его подачи дозирующими системами в зону наплавки. Высокая текучесть характерна для порошков, имеющих сферическую форму частиц.

4. Однородность фракционного состава и высокая устойчивость против сегрегации. В противном случае покрытие формируется со значитель-

ной неоднородностью химического и фазового состава, а следовательно, и эксплуатационных свойств.

5. Близость теплофизических характеристик материала порошка и материала подложки, в частности коэффициента линейного расширения. В противном случае при охлаждении наплавленного покрытия возникают значительные растягивающие напряжения, и существует опасность растрескивания покрытия.

6. Наплавленное покрытие должно обладать заданным комплексом эксплуатационных свойств (твёрдость, износостойкость, коррозионная стойкость и т.д.) при достаточной обрабатываемости резанием (точением, шлифованием).

Наиболее полно указанным требованиям отвечают самофлюсующиеся сплавы. Самофлюсующимися их называются потому, что они могут быть оплавлены в окислительной или нейтральной атмосфере в плотное, беспористое покрытие.

Наиболее распространенными самофлюсующимися порошками являются сплавы на основе никеля, легированные бором и кремнием. Они отличаются высокими технологическими свойствами и низкой температурой плавления, что позволяет наплавлять стальные детали на воздухе. Покрытия стойки к воздействию агрессивных сред, повышенных температур, износоустойчивы при трении по металлу со смазкой и без смазки, а также при абразивном изнашивании. По уровню износостойкости покрытия из самофлюсующихся сплавов в 3-5 раз превосходят закаленные инструментальные стали. По американской спецификации эти сплавы имеют торговое название "Колмонои", а сплавы подобного типа в Японии называются "Фукудалои".

В таблицах 3.19 – 3.21 представлены марки и области применения самофлюсующихся порошков на никелевой основе в разное время выпускавшихся в СНГ и за рубежом. К сожалению, в настоящее время АК "Тулачермет" значительно сократила номенклатуру выпускаемых самофлюсующихся порошков.

Самофлюсующиеся порошки на основе кобальта обладают повышенной коррозионной стойкостью и устойчивостью против трещинообразования. Одним из распространенных в СНГ порошков этого вида является порошок ПГ-10К01 (ТУ 48-4206-156-82). Его химический состав (% по массе): 35...39 Со; 28...32 Ni; 25...25 Cr; 1,2...1,8 В; 1,3...1,7 С; 0,8...1,3 W; 0,1 Fe. Высокая стоимость самофлюсующихся порошков на основе кобальта ограничивает их применение.

3.21. Назначение самофлюсующихся порошков на основе никеля

Область применения, назначение и характеристика	Марка порошка
Наплавка	
На углеродистые, нержавеющие стали и чугуны; для защиты от изнашивания и коррозии; для работы при высоких температурах	ПГ-СР4; ПГ-СР3; ПГ-10Н-01; ПГ-10Н-03; СНГН-55; СНГН-60; ПР-Н67Х18С5Р4; ПГ-Н70Х14С4Р4

При наличии ударных и сдавливающих нагрузок	ПГ-10Н-04; ПГ-10К-01; СНГН-50; ПР-Н80Х13С2Р; ПР-Н77Х15С3Р2; ПР-Н68Х21С5Р; ПГ-СР2
При изнашивании в условиях трения скольжения, эрозии	ПС-10НВК-01
Заварка дефектов чугуна	НПЧ-1; НПЧ-2; НПЧ-3; ПР-НДЧ2СР
Жаропрочные обрабатываемые покрытия	ПР-Н65Х25С3Р3
При интенсивном абразивном изнашивании (необрабатываемые покрытия)	ВСНГН-35; ВСНГН-80; ПР-Н67Х18С5Р4; ПГ-СР4
Для защиты от коррозии	ПГСР2; ПГ-10Н-04; ПР-Н80Х13С2Р
Напыление с последующим оплавлением	
На стали и чугуны (низкий коэффициент трения, сопротивление ударам)	ПГ-12Н-01
При трении металла по металлу, коррозии, термических ударах	ПГ-12Н-02; ПГ-12НВК-01
При изнашивании (низкий коэффициент трения)	ПГ-12Н-03

Наряду с неоспоримыми преимуществами самофлюсующимся порошкам на никелевой основе присущ ряд серьезных недостатков, значительно снижающих эффективность восстановления деталей:

1. Высокая стоимость, обусловленная применением дорогостоящего металла основы – никеля. Высокий комплекс защитных свойств покрытий из никелевых самофлюсующихся порошков зачастую является избыточным. Высокие коррозионная, жаро- и теплостойкость часто остаются невостребованными.

2. Низкая трещиностойкость при нанесении покрытий на стальные детали, обусловленная высоким коэффициентом линейного расширения. На практике, применяют предварительный подогрев, особенно массивных восстанавливаемых деталей, и контролируемое охлаждение для устранения растрескивания. Это также ограничивает применение покрытий из никелевых самофлюсующихся порошков в условиях термоциклирования.

3. Высокая чувствительность к технологическим режимам нанесения покрытия. Требуемый комплекс свойств покрытия достигается лишь при сохранении однородной мелкодисперсной структуры исходного порошка. Даже незначительный перегрев резко снижает качества покрытия.

4. Трудоемкость последующей механической обработки покрытия. Это значительно повышает стоимость восстановления деталей.

Все это ограничивает применение материалов на основе никеля. В большинстве случаев детали целесообразно наплавлять менее дорогостоящими самофлюсующимися сплавами на железной основе.

Находят применение два типа самофлюсующихся порошков на железной основе:

- **объемно-легированные порошки**, полученные распылением расплава (табл. 3.22);

- **диффузионно-легированные порошки**, полученные методом химико-термической обработки стального или чугунного порошка (табл. 3.23).

Объемно-легированные порошки имеют гетерогенную структуру с равномерным по сечению распределением легирующих элементов. Диффузионно-легированные самофлюсующиеся порошки являются по сути композиционными и состоят из металлического ядра и диффузионного боро-силицидного слоя, в котором сконцентрированы флюсующе-раскисляющие элементы (рис. 3.7). Повышенная концентрация флюсующе-раскисляющих элементов в поверхностном слое частиц порошка способствует более эффективному раскислению зоны наплавки. Получаемые покрытия имеют гетерогенную структуру (рис. 3.8) и высокие триботехнические свойства.

Специфические свойства имеют **порошки тугоплавких соединений**. К ним относятся карбиды, оксиды, бориды, нитриды, интерметаллиды и их комбинации. Наиболее часто их применяют для напыления газотермических покрытий. Широко используют оксиды и карбиды.

По сравнению с другими высокотемпературными материалами оксиды имеют наиболее низкую теплопроводность и электропроводность, но значительную прочность при высоких температурах. Оксиды подразделяются на простые и сложные. Простые представляют собой соединения одного металла с кислородом, а сложные – соединения оксидов двух или более металлов. Наиболее высокие температуры, как правило, могут выдерживать простые оксиды. Сложные оксиды в основном являются тугоплавкими материалами, однако температура плавления их более низкая, чем входящих в них компонентов.

Не все оксиды при высоких температурах являются химически устойчивыми. В восстановительной среде при высокой температуре оксиды церия, хрома, никеля, олова, титана и цинка, легко восстанавливаются и превращаются в металлы или низшие оксиды, имеющие невысокие температуры плавления. Тугоплавкие оксиды ниобия, марганца, ванадия неустойчивы при нагреве в окислительной среде. Они превращаются в оксиды более высокой валентности, имеющие более низкую температуру плавления. При нагреве оксида хрома до 2273 К начинается его активное испарение. Оксиды бериллия, магния, циркония и тория устойчивы при высоких температурах (табл. 3.24).

При нагреве диоксида циркония при температуре около 1473 К протекает эндотермическая реакция, сопровождающаяся усадкой из-за структурных превращений. При отжиге диоксида циркония с добавками оксида кальция или оксида магния эти превращения можно подавить. В результате получают стабилизированный диоксид циркония, покрытия из которого обладают большей стойкостью к тепловым ударам и реже отделяются от основы по сравнению с покрытиями из нестабилизированного ZrO_2 .

Порошки из стабилизированного ZrO_2 обеспечивают получение теплозащитных слоев, которые при температуре рабочей среды выше 1273 К снижают температуру металлической поверхности охлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей на 30...140° и более. Покрытия из порошков на основе диоксида циркония стойки в расплавах металлов и защищают поверхность от эрозии частицами при температуре выше 1100 К.

Покрытия из порошков серого оксида алюминия рекомендуются для плазменного напыления антикавитационных покрытий, стойких к эрозии частицами при температуре до 820 К, а также в расплавах металлов (цинка, алюминия и меди). Диоксид титана Metco 102 и композит Metco 111 ($Cr_2O_3+TiO_2$) рекомендуются для покрытий, стойких к абразивному воздействию частицами и твердыми поверхностями при повышенных температурах. Покрытия из оксида хрома, кроме того, позволяют защищать детали машин от кавитации и эрозии частицами.

Температура плавления карбидов металлов значительно выше, чем температура плавления металлов. Температуры, при которых происходит размягчение карбидов, превышают 3273 К. При нагреве в окислительной атмосфере некоторые карбиды могут разрушаться. Однако большинство из них обладает в этих условиях лучшей жаростойкостью по сравнению с жаростойкими металлами. Значительная часть карбидов имеет большую стойкость к окислению, чем углерод и графит. Эта особенность карбидов и высокие механические свойства при высокой температуре обеспечивают 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 твердостью, широко применяются при изготовлении режущих и шлифовальных инструментов, а также при напылении с целью повышения износостойкости. Для напыления в основном используют карбиды вольфрама, хрома, титана, циркония и тантала. Наиболее широко применяется карбид вольфрама. Как напыляемые материалы карбиды нередко используют в смеси со связующим, в качестве которого для карбида вольфрама применяют кобальт (12...17%), а для карбида хрома – сплавы никеля (15...25%).

Сочетание положительных свойств различных типов порошков и получение частиц, удовлетворяющих комплексу требований, реализуются в **композиционных порошках**. В зависимости от конструкции различают плакированные и конгломератные композиционные частицы (рис. 3.9). Первые представляют собой исходную частицу одного из материалов, на поверхности которой расположен слой или несколько слоев других материалов. Конгломератная частица сформирована из множества исходных частиц нескольких материалов.

В табл. 3.25 представлены композиционные порошки производства НПО "Тулачермет". Они предназначены для напыления подслоев, получе-

ния износостойких слоев на различных деталях. Это экзотермически реагирующие при напылении порошки, образующие соединения Ni с Al. Покрытия отличаются хорошей износостойкостью в сочетании с коррозионной стойкостью и сопротивлением ударным нагрузкам.

Композиционный порошок ПТ-19Н-01, изготовленный на Торезском заводе наплавочных твердых сплавов, получен методом конгломерирования. Он состоит из ядра самофлюсующегося никелевого сплава, покрытого слоем частиц алюминия. При напылении он обладает экзотермическим эффектом. Наплавленный слой устойчив к коррозии и изнашиванию. Применяется для восстановления и упрочнения поршней гидравлических машин, шпинделей станков, шеек валов и др. Как правило, покрытия из порошка ПТ-19Н-01 напыляют на подслой из порошка ПТ-НА-01, который представляет собой композит из ядра никеля, покрытого мелкими частицами алюминия. В результате взаимодействия алюминия с никелем в процессе напыления происходит экзотермическая реакция, обеспечивающая увеличение металлургической связи напыляемого материала с поверхностью детали. Порошок используют для нанесения подслоя при напылении покрытий из всех порошков серии 19.

Для восстановления размеров и регулирования зазоров в пневмокомпрессорах, пневматическом, гидравлическом оборудовании, а также при непродолжительной работе при 923...1200 К и термических ударах рекомендуется использовать самосвязывающиеся покрытия из композитного порошка Metco 443. Он состоит из нихрома, конгломерированного с 6% Al. Покрытия из такого порошка можно использовать в качестве подслоя.

Композитный порошок Metco 445 позволяет получать покрытия типа лучших алюминиевых бронз. Он состоит из смеси порошков меди и алюминия на органической связке. Стойкость к абразивному изнашиванию покрытия из порошка Metco 445 в 2...3 раза выше, чем из алюминиевой бронзы, полученной распылением, и в 2 раза выше, чем напыленного из проволоки электродуговым способом. Этому способствует высокое содержание в покрытии оксидов и твердых частиц алюминидов меди. Покрытие легко обрабатывается твердосплавными резцами. Материал применяется для повышения износостойкости рабочих поверхностей компенсаторных и уплотнительных колец, ползунов, направляющих штоков поршней гидроцилиндров, штампов, подшипников скольжения. Невысокая прочность сцепления покрытий с подложкой требует применения подслоев.

Эффективной технологией получения композиционных порошков является высокотемпературный синтез тугоплавких соединений в присутствии металла-связки (таблица 3.26).

Наряду с композиционными частицами сочетание положительных свойств различных порошков достигается за счет напыления их *механических смесей*. Торезский завод наплавочных твердых сплавов выпускает смесь ПС-12НВК-01, состоящую из 65% самофлюсующегося материала

ПГ-10Н-01 и 35% карбида вольфрама. Вначале напыляют подслоем ПГ-10Н-01, затем указанную смесь с оплавлением полученного покрытия. Твердость его составляет 57...64 HRC₃, рабочая температура – до 970 К, толщина – до 2 мм. Покрытия обладают высоким сопротивлением к истиранию и эрозии при обычных и повышенных температурах. Их применяют для упрочнения и восстановления шнеков, скребков мешалок, режущих инструментов и т. д.

Составы Metco 442 и 444 изготовлены механическим смешением мелких фракций порошков нихрома, молибдена и алюминия. Их рекомендуют для напыления твердых подшипниковых покрытий. Широкое распространение получил порошок Metco 451, который представляет собой механическую смесь порошков никеля, хрома и алюминия, экзотермически реагирующих в процессе плазменного напыления. Покрытия отличаются высокой плотностью, твердостью, износостойкостью, кавитационной, эрозионной и коррозионной стойкостью. Механическая смесь тонких порошков самофлюсующегося никелевого сплава и чистого молибдена (Metco 501) обеспечивает получение покрытий с высокой плотностью, твердостью, износостойкостью. Они хорошо шлифуются, полируются, их можно использовать в подшипниковых соединениях. При напылении составов Metco 451 и 501 необходимо предварительно наносить подслои.

3.6. Порошковая проволока ленты и шнуры

Идея создания "трубчатого электрода с сердцевинной из разного типа порошков" принадлежит изобретателю дуговой сварки Н.Н. Бенардосу. В настоящее время выпускается сотни марок различных **порошковых проволок, лент и шнуров**. Важнейшими преимуществами этих материалов являются равномерность подачи присадочного материала в зону наплавки, отсутствии сегрегации порошковых компонентов и широкий диапазон легирования наплавленного слоя или напыленного покрытия.

Порошковая проволока состоит из мягкой тонколистовой металлической оболочки и сердцевинной, которая представляет собой смесь порошков ферросплавов, чистых металлов, карбидов, боридов, раскислителей, шлакообразующих и стабилизирующих горение дуги веществ (рис. 3.10). Наиболее распространенный диаметр порошковой проволоки 2,6...3,6 мм, однако для наплавки крупногабаритных деталей используют проволоку диаметром до 8 мм.

Порошковую проволоку выпускают четырех типов: для наплавки под флюсом, в среде защитных газов, в атмосфере воздуха, универсальную.

В странах СНГ выпускают легированную и высоколегированную порошковую проволоку, обеспечивающую износостойкую и коррозионно-стойкую наплавку (табл. 3.27). Для нанесения слоя бронзы на стальные изделия в Институте электросварки им. Е. О. Патона разработана порошковая проволока с медной оболочкой. Например, проволоку ПП БрАЖ9-4 ис-

пользуют при наплавке в защитном газе, ПП Бр8-21 – при наплавке под флюсом.

Ленточные электроды позволяют повысить производительность процесса наплавки и уменьшить глубину проплавления основного металла. Холоднокатаную ленту можно изготовить только из пластичных деформируемых сплавов с невысоким содержанием углерода, поэтому изготавливают спеченную и порошковую ленты. **Спеченную металлокерамическую ленту** на железной основе изготавливают из смеси металлических порошков, ферросплавов, графита и других компонентов путем холодной прокатки смеси и последующего спекания в защитной среде. **Порошковую ленту** (рис. 3.11) изготавливают из стальной оболочки и молотых порошков. В отличие от порошковой проволоки ее не подвергают волочению.

Особую группу материалов для газопламенного напыления покрытий составляют **гибкие порошковые шнуры "Сфекорд"**. Они созданы в 70-х годах французской фирмой "Сфек".

Важными преимуществами проволоочного и стержневого процессов по сравнению с порошковым являются нагрев материала до жидкого состояния и нанесение на поверхность изделия покрытия из таких расплавленных частиц с высокой скоростью. При напылении некоторых материалов (оксидов) скорость полета частиц достигает 200 м/с. Полученные таким образом покрытия по прочности и плотности не уступают плазменным, а стоимость их ниже плазменных в 2–3 раза.

Использование для напыления материалов в виде шнура диаметром 1,5...6,35 мм, намотанного на бобинку, обеспечивает при газопламенном напылении покрытий следующие преимущества: высокую чистоту покрытий; исключение недостатков использования стержней (дефекты в начале и конце стержня); заданную точность диаметра шнура; высокий коэффициент использования материала; полную автоматизацию процесса напыления с прекращением и возобновлением подачи шнура; устранение износа деталей горелки.

Для напыления покрытий без последующей термообработки используют шнуры серий "Сфекорд-керамика" и "Сфекорд-экзо" (из порошковых сплавов на основе никеля, железа, меди, интерметаллидов и термореагирующих материалов), для напыления с последующим оплавлением – "Рокдюр" (из самофлюсующихся сплавов на основе никеля, кобальта и их смесей с карбидом вольфрама). Характеристика этих материалов следующая.

Оксид алюминия белый с твердостью покрытия 1195 HV, имеет температуру плавления 2320 К. Обрабатывается шлифованием кругами из карбида кремния или алмаза. Покрытие является прекрасным диэлектриком, стойко к коррозии. Оксид алюминия голубой имеет твердость покрытия немного ниже, чем из белого корунда. Покрытие стойко к коррозии и абразивному воздействию, а также к износу в условиях трения при высоких температурах.

Шнур из оксида хрома обеспечивает в покрытии две фазы с твердостью 1000 и 1770 HV. Температура плавления составляет 2708 К. Покрытие обрабатывается шлифованием алмазными кругами. Обладает высокой стойкостью к абразивному воздействию, имеет высокий коэффициент трения.

Гибкий шнур из оксида титана (температура плавления 2180 К) обеспечивает твердость покрытия 803 HV. Покрытие обрабатывается шлифованием кругами из карбида кремния, оно имеет низкий коэффициент трения и высокую электропроводность.

Гибкий шнур из черного корунда (оксид алюминия с 40% оксида титана) используется для напыления покрытий с высокой стойкостью к износу и большинству кислот и с низкой пористостью. Покрытие имеет твердость 1000 HV и температуру плавления 2110 К. Хорошо обрабатывается кругами из карбида кремния.

Покрытия из гибкого шнура муллит, состоящего из оксидов алюминия и кремния, имеют твердость 770 HV и температуру плавления 2093 К. Обрабатываются кругами из карбида кремния и обладают высокими диэлектрическими свойствами, стойки к жидким металлам и высоким температурам.

Гибкий шнур, состоящий из механической смеси оксидов сложного химического состава, используется для газопламенного напыления электроизоляционных покрытий, обеспечивающих высокую стойкость к абразивному воздействию. Твердость покрытий 1000 HV, температура плавления материала 2373 К. Они обрабатываются шлифованием кругами из карбида кремния.

Для газопламенного напыления термобарьерных покрытий производятся шнуры из цирконата кальция и оксида циркония. Твердость их составляет соответственно 750 и 900 HV, а температура плавления – 2600 и 2923 К. Они обрабатываются кругами из карбида кремния.

Композиционный гибкий шнуровой материал "Ниалид-экзо бонд" на основе никель-алюминия, состоит из компонентов, которые экзотермически реагируют в процессе напыления. Материал обеспечивает получение плотных покрытий с высокой прочностью сцепления к подложке из цветных и черных металлов, за исключением чистой меди. Основное применение материала – напыление подслоя для последующего нанесения других износостойких материалов. Может быть использован для защиты изделий от окисления и получения на деталях пар трения восстановительных мягких покрытий, легко обрабатываемых лезвийным инструментом. Рекомендуемая толщина покрытия для подслоя 0,05...0,15 мм, дистанция напыления – 150...200 мм.

Материал "Сфекорд-экзо № 20" изготовлен на основе никель-хромового сплава, наносится на изделия через подслоя из материала "Ниалид-экзо бонд". Возможно применение в качестве подслоя шнурового материала.

ла "Ниаид". Напыленное покрытие характеризуется высокой устойчивостью к трению металла о металл, окислению и высокой температуре. Легко обрабатывается лезвийным инструментом. Наносится на все черные металлы, медные и алюминиевые сплавы при низкой температуре (разогрев основного металла не превышает 523 К). Этим обеспечивается отсутствие деформаций и структурных изменений в основном металле. Материал применяется для восстановления поршней гидравлических механизмов, опорных поверхностей сальников и подшипников. Дистанция напыления – 120...150 мм, рекомендуемая толщина покрытия до 2,5 мм.

Шнуровой материал "Сфекорд-экзо № 30" состоит из никелевого самофлюсующегося сплава и никель-алюминиевого композита. Предназначен исключительно для напыления покрытий без оплавления. Нагрев основного металла детали после напыления поверхности не превышает 523 К. Обеспечивает получение твердого, плотного покрытия, которое характеризуется высокими антифрикционными свойствами, устойчиво к окислению и коррозии. Абразивная стойкость низкая. Многократные ударные воздействия на покрытие не допускаются. Обработка слоя может осуществляться лезвийным инструментом, но высокое качество рабочей поверхности достигается только после шлифования. Наносится через подслоя из материала "Ниаид-экзо бонд" на все черные металлы, медные и алюминиевые сплавы. Возможно применение без промежуточных слоев при толщине покрытий до 0,07 мм и в качестве подслоя шнурового материала "Ниаид". Шнуровой материал применяется для восстановления шпинделей станков, поршней гидравлических домкратов, опорных поверхностей подшипников, сальников и кулачковых валов, коленчатых валов, крышек экструзионных прессов и др. Твердость покрытия до 33 HRC. Дистанция напыления составляет 120...150 мм. При необходимости допускается ее увеличение до 200 мм.

Композиционный гибкий шнуровой материал "Сфекорд-экзо № 40" готовят на основе никелевого самофлюсующегося сплава, никель-алюминиевого композита и специального твердого сплава. Предназначен для напыления покрытий без оплавления. Разогрев основного металла детали также не превышает 523 К. Материал обеспечивает получение твердого и плотного покрытия. Формируемая в процессе напыления неоднородная структура покрытия обеспечивает упрочненным изделиям повышенные антифрикционные свойства и износостойкость при трении металла о металл. Абразивная износостойкость удовлетворительная, но ударные воздействия на покрытие не допускаются. При обработке покрытия шлифовальным кругом достигается высокое качество рабочей поверхности. При этом полученный слой обладает эффектом самосмазывания за счет контролируемой микропористости. Шнуровой материал наносится только через подслоя из материала "Ниаид-экзо бонд" на все черные металлы, медные и алюминиевые сплавы. Применять его без подслоя не рекомендуется. Воз-

можно применение в качестве подслоя шнурового материала "Ниалид". Основное применение материала – напыление коленчатых валов двигателей, шпинделей станков, мест под подшипники, для защитных втулок и муфт валов и др. Твердость покрытия 28...42 HRC. Дистанция напыления 120...150 мм, оптимальная толщина покрытия 0,5...1,0 мм, его максимальная толщина – до 1,5 мм.

Композиционный шнуровой материал "Сфекорд-экзо № 50" готовят на основе специального твердого сплава и никель-алюминиевого композита. Обеспечивает получение защитных покрытий высокой твердости и абразивной износостойкости в сочетании с отличными антифрикционными свойствами. Последующая механическая обработка покрытия допускается только шлифованием. Рекомендуется применять для упрочнения коленчатых валов двигателей и холодильных установок, для защиты от абразивного изнашивания крупногабаритных деталей машин и агрегатов, восстановление и упрочнение которых известными способами наплавки и напыления невозможно. Рекомендуется применять только с подслоем из шнурового материала "Ниалид-экзо бонд" или "Ниалид". Твердость покрытия не менее 40 HRC, рекомендуемая толщина 0,3...0,75 мм, дистанция напыления 120...150 мм.

Шнуровой материал на основе алюминиевой бронзы Сфекорд-бронза № 1 наносится на все черные металлы, медные и алюминиевые сплавы через подслой "Ниалид-экзо бонд". Напыленное покрытие характеризуется высокими антифрикционными свойствами, имеет низкий коэффициент трения. Благодаря контролируемой микропористости работает как спеченный антифрикционный материал. Сопротивление ударам удовлетворительное. Материал отлично обрабатывается. Применяется для напыления компрессорных поршней, цапф, шкивов и юбок поршней, вилок переключения скоростей и др. Рекомендуемая толщина покрытия до 3,0 мм. Возможно получение и более толстых слоев. Дистанция напыления 120... 180 мм.

Материал "Сфекорд-бронза № 2" на основе оловянно-цинко-свинцовистой бронзы предназначен для напыления вкладышей подшипников скольжения.

Шнуровой материал "Рокдюр 47" состоит из никелевого самофлюсующегося порошка. Покрытия из него имеют твердость 35...40 HRC и температуру плавления 1273К. Они могут быть обработаны резцами из карбидных твердых сплавов, обладают высокой стойкостью к коррозии при повышенной температуре (до 927 К) и высокой износостойкостью.

Гибкий шнур из самофлюсующегося никелевого сплава "Рокдюр 67", имеющего очень высокую твердость (55...60 HRC) и температуру плавления 1273 К, позволяет при напылении получить покрытия, стойкие к коррозии и абразивному воздействию. Они обрабатываются кругами из карби-

да кремния и алмазов, применяются в узлах трения при тяжелых нагрузках и абразивно-коррозионных средах.

Гибкий шнур из самофлюсующегося сплава на кобальтовой основе предназначен для получения покрытий с последующим оплавлением, стойких к коррозии и абразивному воздействию при высоких температурах и динамическому воздействию. Покрытие имеет невысокую твердость (45 HRC) по сравнению с покрытиями из других самофлюсующихся никелевых сплавов и повышенную температуру плавления (1473 К), однако из-за уникальных свойств кобальта во многих случаях превосходит их. Обрабатывается кругами из карбида кремния.

Гибкий шнур из никелевого самофлюсующегося твердого сплава с 50% карбида вольфрама ("Рокдюр 6750") имеет две твердые фазы с твердостью 57 HRC и 2200 HV. Температура его плавления 1273 К. Покрытия обладают самой высокой стойкостью к абразивному воздействию. Обрабатываются только алмазными кругами.

Кроме отмеченных материалов в виде шнура могут быть использованы другие сплавы, например титан – никель или их смеси с керамическими порошками, карбидами и др. Такие смеси известны под названием "керметы". Они позволяют соединить свойства пластичности и механической прочности металлов с твердостью и высокой температурой плавления оксидов. Этот процесс очень трудно осуществить методом порошкового напыления из-за сегрегации порошков. В порошковом шнуре обеспечиваются однородность составляющих и их полное плавление.

Для получения твердых покрытий с низким коэффициентом трения, состоящих из твердой матрицы и твердой смазки, изготавливает гибкие шнуры, содержащие металлы (никель) или оксид ($\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cr}_2\text{O}_3$) с графитом или дисульфидом молибдена. С помощью шнура можно также создать в пламени композицию специальных сплавов или сочетание таких элементов, как бор, кремний, титан, молибден, позволяющих получать твердые покрытия, диспергированные фазами боридов, силицидов и других веществ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Чтобы завоевать позиции на рынке товаров, восстановительное производство должно достичь и поддерживать нормативный уровень качества выпускаемых деталей, а для повышения своей эффективности - непрерывно уменьшать удельный расход производственных ресурсов. Это обеспечивается повышением технического уровня производства за счет совершенствования средств восстановления деталей при полной их загрузке, внедрения новых технологических процессов и передовой организации труда.

Информационной базой для совершенствования производства служат сведения о качестве своей отремонтированной (восстановленной) продукции, в том числе о ее послеремонтной наработке.

Качество восстановления деталей выявляют с помощью четырех групп сведений: результатов операционного контроля ремонтируемых и восстанавливаемых изделий во время их испытания и анализа выявленных дефектов; учета дефектов, обнаруженных пользователем техники в гарантийный период эксплуатации; данных о послеремонтной наработке и отказах в подконтрольной эксплуатации; изучения повреждений ремонтного фонда, поступившего на завод. Наибольший объем информации несут сведения первых трех групп.

Если будут выдержаны все требования нормативной документации в части значений параметров восстановленных деталей, то и послеремонтная нормативная наработка техники будет обеспечена. Практика ремонта показывает, что в количественном отношении выполняются не все указанные требования. Наиболее полно значения параметров выдерживаются при централизованном восстановлении деталей, отличающемся наилучшей организацией.

Мероприятия, обеспечивающие достижение нормативного уровня качества, сводятся к действию системы качества и совершенствованию СТО.

Каждый завод, заинтересованный в повышении качества своей продукции, создает и реализует соответствующую программу, которая включает выявление причин недостаточной послеремонтной наработки продукции и выработку корректирующих воздействий. Программа разрабатывается на длительный период времени, части ее входят в годовые планы внедрения новой техники и организационно-технических мероприятий завода. Программа включает разделы по совершенствованию разборочно-очистных процессов, определения технического состояния, восстановления и комплектования деталей и других технологических процессов. Реализация этих мероприятий с целью обеспечения каждого нормативного требования к качеству ремонта (восстановления) изделий связана с начальным (на стадии технологической подготовки производства) и текущим (в процессе самого производства) расходом ресурсов.

Даже небольшое ужесточение точности восстанавливаемых параметров требует модернизации или замены средств технологического оснащения, что связано с вложением значительных финансовых средств.

Таким образом, цена качества ремонта складывается из создания и функционирования системы обеспечения качества ремонта, подготовки производственного персонала, обеспечения средствами ремонта необходимой точности и средствами измерений и контроля. Наибольшие затраты связаны с совершенствованием материальной базы ремонта, в которую входят технологическое оборудование (созданное в собственном вспомогательном производстве и приобретенное), технологическая оснастка, испытательные и контрольные средства. Расчеты показывают, что достижение нормативной послеремонтной наработки требует вложений в действующее производство денежных средств в размере выручки от реализации товарной продукции, выпущенной в течение 0,5...1,5 лет.

Снижение расхода производственных ресурсов требует непрерывной работы по их нормированию и учету, контролю работы действующего технологического оборудования, анализу количества отходов и другие направления деятельности. При нормировании расхода ресурсов выделяют долю научно обоснованного расхода с учетом объективных физических законом и долю их расхода, связанного с несовершенством технологического процесса, недостаточным КПД оборудования и прямыми потерями. По уменьшению второй доли расхода ресурсов намечают мероприятия.

Технический уровень восстановительного производства - это характеристика его технического совершенства. Этот показатель оценивают путем сопоставления достигнутых значений установленных показателей с их базовыми значениями. Высокого технического уровня достигает то производство, которое располагает разнообразными современными технологиями и оборудованием для их реализации.

Показатели технического уровня восстановительного производства: себестоимость продукции; годовой выпуск продукции на 1 руб. основных производственных фондов или на одного работающего, рентабельность.

Изучение и использование СТО, технологических процессов и форм организации, изложенных в учебнике, будут способствовать повышению технического уровня и эффективности восстановительного производства.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Батищев А.Н., Голубев И.Г., Лялякин В.П. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники. - М.: Информтехиздат, 1995.-296 с.
 2. Воловик Е.Л. Справочник по восстановлению деталей. - М.: Колос, 1981.- 351 с.
 3. Восстановление деталей машин: Справочник /Пантелеенко Ф.И., Лялякин В.П., Иванов В.П., Константинов В.М.; Под ред. В.П. Иванова – М.: Машиностроение, 2003. - 672 с.
 4. Иванов В.П. Разработка и обоснование технологического процесса восстановления деталей на специализированном предприятии /Технология металлов, 2001.- № 9. - С. 28-31.
 5. Молодык Н.В., Зенкин А.С. Восстановление деталей машин: Справочник.- М.: Машиностроение, 1989. - 480 с.
 6. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: учебник для высших технических учебных заведений. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 528с..
- Вспомогательная
7. Базров Б.М. Модульная технология изготовления деталей. – М.: ВНИИТЭМР, 1987. – 52 с.
 8. Бетень Г.Ф. Восстановление и упрочнение почворезущих элементов диффузионным намораживанием износостойкими сплавами. – Мн.: БГАТУ, 2003 – 188 с.
 9. Васильев Л.А. Модульный принцип формирования техники, - М.: Издательство стандартов, 1989. – 240 с.
 10. Ворошнин Л.Г., Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО – Мн.: ФТИ, Новополоцк: ПГУ.- 1999.- 133 с.
 11. Гаркунов Д.Н. Триботехника: Учебн. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
 12. Дорожкин Н.Н., Гимельфарб В.Н. Восстановление деталей сельскохозяйственных машин. - Мн.: Ураджай, 1987.- 140 с.
 13. Завистовский В.Э., Холодилов О.В., Богданович П.Н. Физика отказов механических систем: Учебное пособие. – Мн.: Технопринт, 1999. – 212 с.
 14. Есенберлин Р.Е. Восстановление автомобильных деталей сваркой, наплавкой и пайкой.- М.: Транспорт, 1994.-320 с.
 15. Газотермические покрытия из порошковых сплавов: Справочник.- /Борисов Ю.Н., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л., Ардаговская Е.Н. – Киев: Наукова думка, 1987.- 544 с.
 16. Иванов В.П. Организация восстановления изношенных деталей машин /Восстановление, ремонт, модернизация, 2002.- № 6.- С. 2-7

17. Ивашко В.С. и др. Электротермическая технология нанесения защитных покрытий /В.С. Ивашко, И.Л. Куприянов, А.И. Шевцов. -Мн.: Навука і тэхніка, 1996.- 375 с.

18. Иващенко С.А., Фролов И.С., Мрочек Ж.А. Газотермические и вакуумно-плазменные покрытия со специальными физико-механическими свойствами. – Мн.: УП “Технопринт”, 2001.- 236 с.

19. Какуевицкий В.А. Восстановление деталей автомобилей на специализированных предприятиях. – М.: Транспорт, 1988. – 149 с.

20. Какуевицкий В.А. Ресурсосберегающие технологии восстановления деталей автомобилей.- М.: Транспорт, 1993.- 176 с.

21. Мрочек Ж.А., Кожуро Л.М., Филонов И.П. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей – М.: УП “Технопринт”, 2000. – 268 с.

22. Надежность и ремонт машин /В.В. Курчаткин, Н.Ф. Тельнов, К.А. Ачкасов и др.; Под ред. В.В. Курчаткина – М.: Колос, 2000. – 776 с.

23. Пантелеенко Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них.- Мн.: УП “Технопринт”, 2001.- 300 с.

24. Пинчук Л.С. Герметология. – Мн.: Навука і тэхніка, 1992. – 216 с.

25. Поляк М.С. Технология упрочнения: Технол. методы упрочнения. В 2 т.- Т. 1.- М.: “Л.В.Т. - Скрипт”, “Машиностроение”, 1995.- 852 с.

26. Поляк М.С. Технология упрочнения: Технол. методы упрочнения. В 2 т.- Т. 2.- М.: “Л.В.Т. - Скрипт”, “Машиностроение”, 1995.- 688 с.

27. Рудик Ф.Я., Элькин С.Ю, Кузнецов В.Ф. Электромеханическая обработка клапанных пружин /Вестник машиностроения, 2001.- № 1.- С. 22-24

28. Рыжов Э.В., Клименко С.А., Гуцаленко О.Г. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями. - К.: Наукова думка, 1994.- 180 с.

29 Соколовский А.П. Научные основы технологии машиностроения. – М. – Л.: Машгиз, 1955. – 515 с.

30Схиртладзе А.Г. Технология восстановления корпусных деталей / Технология металлов, 2001.- № 12. - С. 30-33

31 Схиртладзе А.Г. Технология восстановления гладких и шлицевых валов /Ремонт, восстановление, модернизация, 2002.- № 5.- С. 18-21

32 Тельнов Н.Ф. Технология очистки сельскохозяйственной техники.- М.: Колос, 1983.- 256 с.

33 Теория и практика нанесения защитных покрытий /П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильющенко и др. - Мн.: Беларуская навука, 1998.- 583 с.