

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
Раздел 1. Структурно-фазовые состояния электродуговых покрытий, стойких против абразивного изнашивания.....	7
1.1. Применение наплавки для восстановления и защиты поверхности деталей машин .....	7
1.2. Абразивный износ, влияние химического состава и структуры на износостойкость .....	10
1.2.1. Особенности абразивного изнашивания.....	10
1.2.2. Механизмы абразивного изнашивания .....	13
1.2.3. Влияние структуры покрытий, наплавленных порошковыми проволоками, на их абразивную износостойкость.....	16
1.2.4. Влияние элементного состава покрытий на их абразивную износостойкость.....	17
1.2.5. Влияние технологических факторов на структуру и свойства покрытий.....	25
1.3. Основные наплавочные материалы для формирования электродуговых покрытий и их характеристики .....	26
1.4. Выводы .....	36
Вопросы для самоконтроля к разделу 1 .....	37
Раздел 2. Применяемое оборудование, материалы, методы и методики экспериментальных исследований .....	38
2.1. Применяемые порошковые проволоки .....	38
2.2. Применяемый способ и оборудование для наплавки электродуговых покрытий.....	39
2.3. Определение химического состава наплавленных покрытий .....	40
2.4. Анализ макро- и микроструктуры, элементного и фазового состава наплавленных покрытий.....	40
2.5. Определение твердости и скорости истирания наплавленных покрытий .....	42
Вопросы для самоконтроля к разделу 2 .....	43
Раздел 3. Исследование структуры и свойств электродуговых покрытий, сформированных с использованием порошковой проволоки системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo, содержащей в качестве флюса техногенные отходы .....	45
3.1. Научное обоснование выбора химического, фазового и компонентного состава порошковой проволоки .....	45
3.2. Научное обоснование и выбор режимов наплавки электродуговых покрытий.....	55
3.3. Исследование микроструктуры и неметаллических включений наплавленного металла .....	55
3.4. Исследование влияния химического состава и концентрации водорода на твердость и абразивную износостойкость электродуговых покрытий .....	67
3.5. Выводы по главе 3 .....	75
Вопросы для самоконтроля к разделу 3 .....	76

Раздел 4. Промышленное апробирование электродуговых покрытий, сформированных с использованием порошковой проволоки системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo, для ремонта горно-шахтного оборудования .....	78
4.1. Промышленное апробирование электродуговых покрытий .....	78
4.2. Оценка экономической эффективности применения новых электродуговых покрытий.....	79
4.3. Выводы по главе 4.....	81
Заключение.....	82
Ответы на вопросы для самоконтроля .....	84
Список литературы .....	91
Дополнительная литература.....	103

## ВВЕДЕНИЕ

Долговечность рабочих поверхностей деталей технологического оборудования главным образом определяется качеством их защиты от износа и коррозии. Большая их часть в течение 2–3 лет эксплуатации теряет до 50% своих функциональных свойств (твердости, износо- и жаростойкости и др.). Это приводит к сокращению срока службы деталей и значительным материальным потерям. Абразивный и ударно-абразивный износ характерен для деталей оборудования в горной, металлургической, строительной, сельскохозяйственной и других отраслях промышленности. Для защиты и восстановления сильно нагруженных деталей, работающих в таких условиях, широко применяются методы наплавки, которые обеспечивают многократное повышение функциональных свойств, основанное на формировании определенной структуры металлов и сплавов. В настоящее время широко распространена электродуговая наплавка, перспективным и интенсивно развивающимся направлением которой является электродуговая наплавка порошковыми проволоками под флюсом. Она обеспечивает оптимальное соотношение свойств поверхности и объема материала детали. В связи с этим проведение теоретических и экспериментальных исследований физической природы, процессов и механизмов упрочнения и формирования защитных свойств поверхностных слоев металлических деталей и изделий посредством электродуговых покрытий, наплавленных порошковыми проволоками, актуально и имеет большое научно-практическое значение.

В последнее время значительные усилия направляются на дополнительное повышение эффективности наплавки путем разработки новых электродных материалов, обеспечивающих требуемые свойства поверхности. Наиболее перспективным направлением в области ремонтно-восстановительных работ изнашивающихся поверхностей деталей является использование электродуговой наплавки порошковыми проволоками.

Возможность повышения качества наплавленного слоя обусловлена, в частности, химическим составом самих порошковых проволок и, как следствие, формированием получаемых при наплавке металла структурно-фазовых состояний, соответствующих условиям эксплуатации обрабатываемых деталей. При этом большое значение имеет выявление и устранение дефектной структуры покрытий, приводящей к их преждевременному разрушению.

Широкое распространение для ремонтных работ на горно-шахтном оборудовании, работающем в условиях абразивного и ударно-абразивного изнашивания, получили наплавочные проволоки систем Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo. В связи с этим продолжают исследования по разработке новых составов порошковых проволок, в частности по изучению влияния в их составе углерод-фторсодержащих компонентов, снижающих содержание водорода, а также влияния Cr, Mo, Ni, W, V и Co на твердость и износостойкость наплавленного слоя.

С использованием высокоинформативных методов современного физического материаловедения получены новые знания о строении, структуре, фазовом составе и физико-механических свойствах покрытий, наплавленных порошковыми проволоками электродуговым методом под флюсом.

Углублены знания о физических процессах формирования структуры и свойств электродуговых покрытий, наплавленных с использованием порошковых проволок системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo, содержащих в качестве флюса техногенные отходы.

Апробирование электродуговых покрытий в условиях эксплуатации на горнодобывающих предприятиях региона показало их высокую эффективность использования для повышения срока службы лопастей шнека комбайна 4LS20. Применение электродуговых покрытий с использованием разработанной проволоки по сравнению с проволокой DRATEC Draht-Technik GmbH (Германия) марки DT-SG 600F позволило увеличить срок службы лопастей шнеков на 19,3%.

Учебное пособие является продолжением исследований по обработке материалов концентрированными потоками энергии, проводимых в научной школе Сибирского государственного индустриального университета, «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий». Для достижения поставленной цели в исследовании использован комплекс методов современного физического материаловедения: оптическая и растровая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ и рентгеноструктурный фазовый анализ, испытания на твердость и износостойкость. Формирование электродуговых покрытий проводили с применением сварочного трактора ASAW-1250. Химический состав наплавленных покрытий определяли рентгенофлюоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71. Содержание водорода в электродуговых покрытиях определяли с помощью хроматографа «Газохром 3101». Измерение твердости выполняли по методу Роквелла на твердомере ТК-14-250 по ГОСТ 9013-59. Абразивную износостойкость покрытий определяли посредством испытаний на износ на машине 2070 СМТ-1.

# **РАЗДЕЛ 1**

## **СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ, СТОЙКИХ ПРОТИВ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ**

### **1.1. Применение наплавки для восстановления и защиты поверхности деталей машин**

Повышение качества и функциональных возможностей деталей машин в значительной степени определяется свойствами их поверхностного слоя. Согласно [1] вследствие коррозии и износа теряется свыше 30% объемов ежегодно выплаваемых металлов. До 70% причин выхода из строя оборудования происходит в результате изнашивания, а потери рабочего времени, вызванные механическим повреждением оборудования, составляют около 80% от общего времени простоев. Согласно [2] со ссылками на американские источники [3–5] 20% в общем износе приходится на абразивный износ, с которым связывают около 50% всех проблем, связанных с износом, а затраты, вызванные последствиями абразивного износа, в развитых странах составляют от 1 до 4% национального продукта [6].

Многие детали и изделия становятся неработоспособными при износе уже более 0,2–0,3 мм. При этом значительная часть поверхности деталей вообще не изнашивается. Вследствие этого из эксплуатации выводятся детали и изделия, которые могли бы служить еще длительное время, если возобновить их первичные параметры поверхности и работоспособность [7]. В настоящее время сформировалось новое научно-техническое направление — инженерия поверхности, занимающаяся разработкой методов обработки поверхностных слоев и нанесения покрытий с заданными свойствами, исследованием их структуры и эксплуатационных свойств.

Значительно увеличить сроки службы и сократить расходы на замену изношенных деталей можно путем использования современных методов восстановления и упрочнения. Главное достоинство восстановления — низкая металлоемкость, поскольку при этом необходимо в 20–30 и более раз меньше металла, чем для изготовления новых. В процессе восстановления изношенных деталей число производственных операций сокращается в 5–8 раз по сравнению с изготовлением новых, а себестоимость не превышает 40–70% цены на новые. За счет восстановления деталей можно сократить расходы на ремонт машин. Благодаря применению современных материалов, технологии и оборудования восстановленные детали в ряде случаев по качеству превосходят новые запасные части.

Для восстановления и упрочнения деталей машин широко применяются разнообразные виды покрытий, которые обеспечивают высокую долговечность и надежность, позволяют восстанавливать размеры и форму деталей, а также сократить затраты дефицитных и дорогих металлов, используемых для объемного легирования. Одним из термических методов нанесения покрытий является наплавка, цель которой — либо восстановление поверхностного слоя со

свойствами, близкими свойствам основы, либо повышение эксплуатационной стойкости путем нанесения специальных покрытий. Наиболее широкое применение наплавка находит при ремонте, так как она позволяет многократно восстанавливать первоначальные размеры и эксплуатационные свойства изношенных деталей [8]. Используя наплавку, можно значительно уменьшить расход дорогостоящих высоколегированных сталей и сплавов, в том числе на изготовление запасных частей.

Способы наплавки различаются источниками тепловой энергии, защитой наплавляемого металла, уровнем автоматизации. К металлургическим и физико-химическим процессам наплавки относится расплавление наносимого металла с частичным расплавлением поверхностного слоя детали, перемешивание расплавов и последующая кристаллизация. Наибольшее распространение получила электродуговая наплавка, осуществляемая ручным и полуавтоматизированным способами. При механизированной наплавке вместо отдельных электродов применяется проволока либо электродная лента. Порошковая проволока представляет собой тонкую трубку из стали с запрессованной в ней порошковой смесью, обеспечивающей получение требуемого состава наплавляемого слоя.

Качество наплавляемого покрытия как совокупность его служебных свойств (таких как геометрические и физико-химические характеристики, микроструктура, микротвердость, поверхностные напряжения) заметно улучшается, когда исключается контакт наплавляемого материала с кислородом воздуха. Для этого процесс проводят в среде углекислого газа, аргона и других газовых смесей. Чаще всего применяется наплавка под слоем флюса. Порошковый флюс, непрерывно подаваемый в зону дуги, образует над швом шлаковую оболочку, которая из-за низкой теплопроводности уменьшает скорость охлаждения наплавленного материала. Это способствует нормализации структуры, а также защищает шов от окисления, предотвращает разбрызгивание металла, доля которого в шве колеблется от 30 до 65%.

В [8] рассмотрены условия эксплуатации, виды изнашивания и повреждения деталей машин и механизмов, физические основы получения наплавляемых покрытий. Описаны наиболее широко применяемые виды наплавки, в том числе механизированная электродуговая наплавка под флюсом, а также особенности физико-химических и металлургических процессов при электродуговой наплавке и используемые материалы (проволоки, в частности порошковые, ленты, флюсы и защитные газы). Уделено внимание методикам расчета напряженно-деформированного и структурного состояния деталей в процессе их изготовления, работы и восстановительной наплавки, оценкам на основе этих расчетов ресурса их последующей безопасной эксплуатации. Описаны, в частности, низкоуглеродистые и углеродистые нелегированные и низколегированные стали, из которых изготавливаются сами детали, а также влияние легирующих элементов на их физико-механические свойства. Проведен анализ структурной наследственности в системе «электродный (присадочный) материал — сварочная ванна — твердый металл». Описаны дефекты (трещины и поры) в наплавляемом металле, их происхождение и меры борьбы с ними, а также контроль качества наплавляемого металла.

К материалам, обладающим высокой стойкостью к образованию трещин при наплавке или хорошей свариваемостью, относятся низкоуглеродистые (содержание  $C \leq 0,25\%$ ) и низколегированные стали (эквивалентное содержание  $C_3 \leq 0,25\%$ ). При наплавке этих сталей не требуется применения специальных технологических приёмов для обеспечения высокого качества наплавленного слоя. Повышенное содержание углерода (или  $C_3$ ) в пределах от 0,26 до 0,45% приводит к возможности образования закалочных структур в зоне термического влияния, что может привести к образованию холодных трещин. Вследствие этого перед наплавкой таких материалов рекомендуется предварительный подогрев до 150–200°C. При их наплавке необходимо строго соблюдать режимы наплавки. Углеродистые стали с содержанием  $C = 0,45\text{--}0,55\%$ , низколегированные стали с содержанием  $C = 0,3\text{--}0,4\%$  (или  $C_3 = 0,45\text{--}0,55\%$ ), медь, алюминий и их сплавы имеют значительную склонность к закалке при наплавке в зоне термического влияния, что приводит к образованию закалочных (холодных) трещин как в интервале температур образования мартенсита, так и после полного остывания. При наплавке таких материалов необходим предварительный подогрев до 100–500°C и высокотемпературный отпуск при 550–600°C непосредственно после наплавки. При наплавке деталей из углеродистых сталей с содержанием углерода более 0,55%, низколегированных сталей с содержанием углерода более 0,4%, специальных сталей (типа Г13Л), чугунов необходим предварительный подогрев наплавляемой детали с высокотемпературным отпуском после наплавки.

Согласно [1] чем больше склонность стали к полной закалке и чем менее пластичной получается структура металла, тем вероятнее образование трещин в околошовной зоне и тем выше должна быть температура предварительного подогрева перед сваркой. Основным элементом, увеличивающим закаливаемость и прокаливаемость сталей, является углерод. Влияние других легирующих элементов, снижающих скорость распада аустенита, может быть оценено пересчетом их содержания в стали в эквивалентное количество углерода. Для пересчета каждого элемента в эквивалентное количество углерода подбирают соответствующие коэффициенты, приведенные в формуле [1]:

$$C_3 = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{10} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2}, \quad (1.1)$$

где содержание элементов дано в процентах, причем содержание меди учитывается при  $Cu \geq 0,5\%$ , а фосфора — при  $P \geq 0,05\%$ .

При  $C_3 \leq 0,35\%$  сварочные и наплавочные процессы могут осуществляться без подогрева. При толщине стали до 6–8 мм предельное значение  $C_3$ , при котором не требуется предварительного подогрева, может составить 0,45–0,50%. При толщине стали более 8 мм и  $C_3 > 0,35\%$  необходим предварительный подогрев, причем тем более высокий, чем выше  $C_3$ .

Следует отметить, что оценка закаливаемости стали при условиях сварки по эквиваленту углерода является весьма приближенной, так как в формуле (1.1) не указывается толщина металла, способ сварки и др. Поэтому была предложена другая эмпирическая формула для расчета эквивалента углерода,

связанная не только с химическим составом свариваемой стали, но и с ее толщиной. В этом случае эквивалент углерода, связанный с химическим составом, определяют по формуле [1]:

$$C_3 = C + \frac{1}{9}(Mn + Cr) + \frac{1}{18}Ni + \frac{1}{13}Mo. \quad (1.2)$$

При этом влияние толщины свариваемого металла учитывается поправкой к эквиваленту углерода  $C_3$ , найденному только с учетом химического состава, по формуле [1]:

$$N = 0,005sC_3, \quad (1.3)$$

где  $N$  — поправка к эквиваленту углерода;  $s$  — толщина свариваемого металла; 0,005 — коэффициент толщины, определенный опытным путем.

Тогда полный эквивалент углерода [1]:

$$C'_3 = C_3 + N = C_3 + 0,005s C_3 = C_3 (1 - 0,005s). \quad (1.4)$$

В этом случае температуру предварительного подогрева  $T_{\text{под}}$  свариваемых деталей определяют по формуле [1]:

$$T_{\text{под}} = 350\sqrt{C'_3 - 0,25}. \quad (1.5)$$

Скорость охлаждения металла при наплавке определяется прежде всего погонной энергией процесса  $J$ , Дж/см, а также зависит от размеров детали, подвергаемой наплавке, свойств основного металла, температуры, предварительного подогрева и разогрева наплавленного металла в процессе наплавки [9]:

$$J = \frac{60IU_{\text{д}}}{v}, \quad (1.6)$$

где  $U_{\text{д}}$  — напряжение на дуге, В;  $I$  — сила тока, А;  $v$  — скорость сварки (наплавки), см/мин.

## 1.2. Абразивный износ, влияние химического состава и структуры на износостойкость

### 1.2.1. Особенности абразивного изнашивания

Для деталей оборудования в горной, металлургической, строительной и других отраслях промышленности наиболее распространенным является абразивный и ударно-абразивный износ. Так, в случае транспортных и дорожных машин более 60% случаев износа имеют абразивный характер. Абразивное изнашивание характерно, в частности, для машин и механизмов, работающих в условиях, когда рабочие органы оборудования непосредственно соприкасаются с добываемыми, транспортируемыми и перерабатываемыми горными породами, режут грунт или почву. Эксплуатационная служба горно-шахтного оборудования напрямую связана с механизмами абразивного износа. Тип наплавленного сплава выбирается на основе его способности сопротивляться определенным видам износа.

В [10] рассмотрены принципиальные основы и начальные условия развития абразивного изнашивания, а также закономерности изнашивания сталей при движении в абразивной массе. Механизм этого вида изнашивания заключается в удалении материала с изнашиваемой поверхности в виде очень мелкой стружки, либо фрагментов металла, выдавленного предварительно по сторонам пластически деформированной царапины, либо в виде дисперсных частиц, хрупко отделяющихся при однократном или многократном воздействии в результате режущего или царапающего действия на него абразивных частиц, находящихся в свободном или закрепленном состоянии. Абразивные частицы чаще всего бывают минерального происхождения. Например, это могут быть куски руды, подвергаемой к дроблению или транспортировке. Они имеют различную форму, часто острые грани или ребра, обладая большей, чем металл, твердостью, при трении под нагрузкой разрушают поверхность деталей и резко увеличивают их износ.

В [4] отмечено, что задача восстановления и обеспечения износостойкости детали решается рациональным выбором материала покрытия и способа его нанесения и обработки. При выборе покрытия необходимо учитывать, что износостойкость зависит не только от свойств материала покрытия, но и в значительной степени от условий работы детали. Покрытие, устойчивое в одних условиях, может катастрофически быстро разрушаться в других. Между износостойкостью и механическими свойствами материала (твердость, прочность и др.) нет прямой связи. Износостойкость покрытия в заданных условиях трения определяют экспериментальным путем. Наиболее полную и объективную информацию об износостойкости деталей дают производственные испытания машин с восстановленными деталями. В [4] отмечено, что задача восстановления и обеспечения износостойкости детали решается рациональным выбором материала покрытия и способа его нанесения и обработки.

Для абразивного изнашивания при трении скольжения по монолитному абразиву характерно высокое внешнее силовое воздействие на поверхность металла. В этих условиях не все частицы абразива в виде выступов и неровностей способны разрушать металл путем микрорезания или многократного пластического деформирования. Часть из них разрушается, не поражая металла, но создавая предпосылки к ухудшению условий изнашивания рабочей поверхности деталей. Интенсивность изнашивания металла при трении о монолитный абразив определяется соотношением их прочностных характеристик. Высокие значения твердости и прочности абразива определяют его способность внедряться в металл и разрушать его путем резания или сжатия при взаимном перемещении, если же металл более твердый и прочный, то разрушается абразив.

В процессе абразивного изнашивания и поверхностные слои металла испытывают сложнапряженное состояние. При этом площадь соприкосновения отдельной частицы абразива с деталью может быть соизмерима с величиной зерна металла. В этих условиях механические и физические свойства структурных составляющих приобретают большее значение, чем общие свойства сплава, определяемые стандартными методами.

Для деталей, изнашивание которых вызывает внешняя рабочая среда, например абразивные частицы, попадающие в зону контакта, одним из основных факторов, обеспечивающих износостойкость покрытия, является его структура. Наибольшее распространение в силу высоких эксплуатационных свойств получили гетерогенные (композиционные) покрытия. Одним из путей их формирования является введение частиц дисперсной упрочняющей фазы в покрытие или синтез таких частиц из компонентов порошковой проволоки непосредственно в процессе наплавки. В этом случае основным фактором, обеспечивающим упрочнение, является выбранный состав покрытия. Высокой износостойкостью обладают, например, гетерогенные покрытия, структура которых состоит из частиц твердой карбидной, боридной или нитридной фазы, удерживаемых в высокопрочной стальной матрице.

Выбор материалов покрытий, соответствующих условиям эксплуатации деталей, проводится на основе их структуры и свойств. При современном уровне развития науки и техники осуществлять такой выбор на основе теоретических расчетов и данных не представляется возможным. В связи с этим научными коллективами российских и зарубежных ученых проводятся экспериментальные исследования процессов структурообразования, механизмов упрочнения и влияния различных факторов на свойства таких покрытий. В частности, в работах [11–26] исследованы покрытия, наплавленные порошковыми проволоками EnDOtec DO\*30, EnDOtec DO\*33 (фирма Castolin) и SK A 70-G G (фирма Soudokay). Они получили широкое распространение для наплавки покрытий, стойких к абразивному износу и эрозии. В результате проведенных исследований установлено, что наплавленные покрытия имели градиентное строение, состоящее из трех слоев, отличающихся друг от друга морфологией элементов субструктуры, и зоны термического влияния. Установлено влияние химического состава использованных порошковых проволок на физико-механические свойства наплавленных покрытий. Коэффициент трения таких покрытий оказался в 1,2–2,0 раза ниже, чем у стальной подложки, а износостойкость — в 2,0–2,5 раза выше.

Физико-механические свойства покрытий, наплавленных порошковой проволокой EnDOtec DO\*30, обусловлены формированием субмикро- и наноразмерной структуры, содержащей частицы карбида  $\text{Fe}_3\text{C}$ , борида  $\text{FeB}$ , карбоборида  $\text{Fe}_{23}(\text{B},\text{C})_6$  и боросилицида  $(\text{Fe},\text{Si})_3\text{B}$  железа (всего 42%). Свойства покрытий, сформированных проволокой EnDOtec DO\*33, обусловлены мелкогазмерными частицами карбидов железа  $\text{Fe}_3\text{C}$ , ниобия  $\text{NbC}$ ,  $\text{Nb}_2\text{C}$ , хрома  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  и  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , силицида железа  $\text{Fe}_3\text{Si}_{0,97}$ , сложных карбидов  $\text{Fe}_3\text{Nb}_3\text{C}$  и  $(\text{Fe},\text{Cr})_7\text{C}_3$  (более 38%). Повышенные по сравнению с основой микротвердость и износостойкость покрытий, наплавленных порошковой проволокой SK A 70-G, обусловлены субмикро- и наноразмерными частицами карбидных и боридных фаз — карбидов железа ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), ниобия ( $\text{NbC}$ ) и хрома ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ), боридов железа ( $\text{FeB}$ ,  $\text{Fe}_3\text{B}$ ), боросилицида железа  $(\text{Fe},\text{Si})_3\text{B}$  и карбоборида хрома  $\text{Cr}_7\text{BC}_4$ , суммарная доля которых достигает 40%.

Сравнительный анализ формируемых структурно-фазовых состояний и свойств наплавленных покрытий показал, что их повышенная износостойкость

обусловлена проявлением двух основных механизмов упрочнения Холла — Петча и дисперсионного твердения, то есть формированием субмикроструктурной структуры  $\alpha$ -фазы и выделением на стадии кристаллизации большого объема высокопрочных частиц вторых фаз.

### **1.2.2. Механизмы абразивного изнашивания**

В работах [23–25] рассмотрены особенности износа высокотвердых покрытий в различных условиях трения. Изнашивание покрытий начинается с металлической связки путем ее микрорезания и пластического деформирования. С углублением связки между твердыми частицами агрессивное влияние абразивного материала на нее резко сокращается, скорость износа при этом уменьшается. Включения частиц упрочняющих фаз препятствуют обоим этим процессам, являясь механическим препятствием на пути движущихся абразивных зерен. В результате они обнажаются, что приводит к выступу их на поверхности трения. Когда при столкновении с абразивными частицами они удаляются с поверхности, износостойкость покрытий резко снижается.

При этом чем меньше расстояние между частицами упрочняющих фаз, тем меньшее влияние оказывает абразивная частица на металлическую связку композиционного материала покрытия. Кроме того, если размер абразивных частиц больше, чем расстояние между частицами, то абразивная частица не может существенно повлиять на более мягкую связку.

По оценкам большинства авторов, износ абразивными зёрнами размером менее 5 мкм в 10–20 раз менее интенсивен, чем зёрнами агрессивных фракций (10–40 мкм). Зёрна размером менее 1 мкм, по мнению ряда исследователей, вообще не оказывают абразивного воздействия на материалы [26].

В работе [23] представлена схема износа наплавленных покрытий (рис. 1.1), которая в реальном масштабе иллюстрирует взаимодействие зерна кварца размером 40 мкм с карбидными частицами размером 1,3 мкм, занимающими около 30% объема сплава. Делается предположение, что независимо от того, катится зерно абразива или режет, карбиды являются весьма слабым препятствием на его пути. Если абразивное зерно оставляет в результате пластического деформирования канавку глубиной 1,2 мкм, оно легко вырывает карбиды или раздвигает их. Если абразивное зерно катится, оно смещает или вдавливают карбиды, постепенно ослабляя их связь с основой и создавая условия для их отрыва при последующих воздействиях других абразивных зерен.

В случае низкой твердости абразивной частицы в отношении материала покрытия и при определенном размере и количестве упрочняющих частиц на поверхности покрытия абразивные частицы не могут изнашивать поверхность, обеспечивая их высокую износостойкость.

В случае абразивного изнашивания самыми существенными структурными показателями, снижающими износостойкость, является соотношение в покрытии карбидов и других высокопрочных и высокомолекулярных фаз со связующим и количество пор. По данным [23], в наплавленном слое деталей количество карбидных частиц размером от 30 до 60 мкм должно составлять 35–45%. В начальной стадии трения абразивная частица изнашивает только связку.

С углублением связующего между твердыми частицами агрессивное влияние абразивного материала на связующее резко сокращается, скорость износа при этом уменьшается.



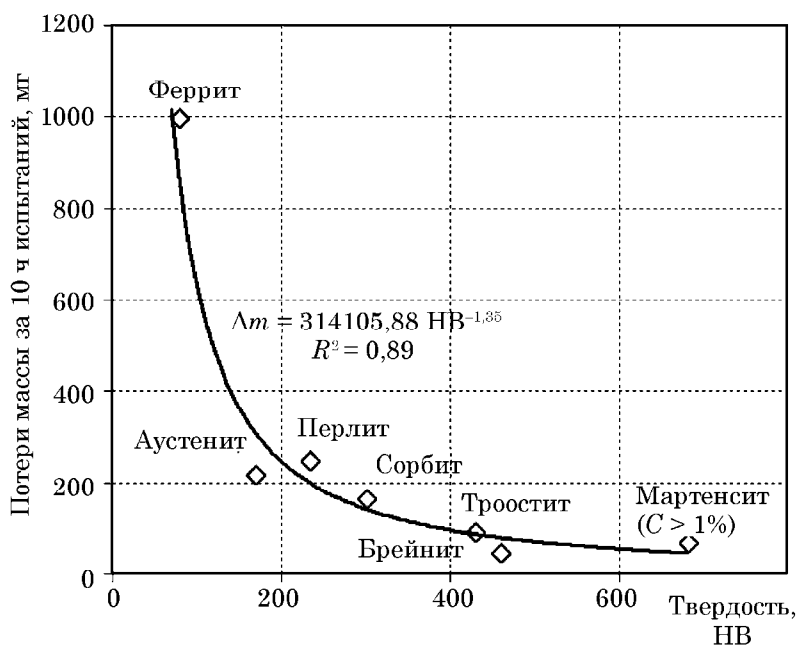
Рис. 1.1

Схема взаимодействия абразивной частицы размером 40 мкм с 30%-ным карбидным твердым сплавом (размеры карбидных частиц 1–3 мкм) [23]

*Изнашивание металлической матрицы.* Влияние структуры металлической матрицы на износостойкость при микроударном воздействии обобщено в работе О. Н. Шагаровой [26]. Основную роль сопротивляемости железоуглеродистых сплавов при микроударном воздействии большинство исследователей отводят карбидам [3, 23]. Однако в [27] отмечено, что влияние типа металлической матрицы на сопротивляемость железоуглеродистых сплавов абразивному изнашиванию имеет не меньшее значение. При этом считается, что матрица должна прочно удерживать карбиды. На рисунке 1.2 представлен график, полученный в результате статистической обработки данных по сопротивляемости металлических матриц микроударному разрушению [27]. Из графика видно, что сопротивляемость, характеризуемая потерями массы  $\Delta m$  металла, фактически имеет степенную зависимость от твердости. Однофазовые железоуглеродистые сплавы феррит и аустенит подвержены максимальному изнашиванию. При этом мартенсит, как пересыщенный твердый раствор  $\gamma$ -Fe, являясь однофазовой структурой, обладает большой твердостью и прочностью, что связано с большим содержанием в нем углерода. Гетерогенные структуры, такие как перлит, сорбит, троостит, бейнит, содержащие карбиды, увеличивают износостойкость по мере увеличения дисперсности структуры.

Изучение влияния на износостойкость широкого диапазона микроструктур сталей 45, У8, У12, 20Х, 18ХГТ, 12ХН3МА, полученных при различных режимах термической обработки [28], также показало, что износостойкость перлита, сорбита и троостита определяется степенью дисперсности цементитных частиц. При этом чем тоньше структура при заданном химическом составе, тем выше износостойкость стали.

В перлитных сталях очаги разрушения сначала возникают в ферритной сетке или на границе раздела между ферритом и карбидами [29].



**Рис. 1.2**

Зависимость сопротивляемости металлических матриц микроударному разрушению от их твердости

Разрушение аустенита и феррита чаще всего начинается с границ зерен. Прочность границ зависит от их строения. При микроударном воздействии на процесс изнашивания большое влияние оказывает величина зерна. В мелкозернистой структуре границы зерен могут быть настолько прочными, что разрушение развивается только в теле зерна. Разрушение кристалла происходит по линиям скольжения. Установлено, что с уменьшением размера зерен число трещин, разрушающих кристаллы по линиям скольжения, уменьшается [30]. Считается, что мелкие зерна более правильно ориентированы одно по отношению к другому, чем крупные. При этом границы мелких зерен более совершенны и, следовательно, более прочны, чем границы крупных зерен [31].

При этом чем меньше расстояние между частицами упрочняющей фазы, тем выше напряжение, необходимое для движения дислокации, и, следовательно, меньше интенсивность изнашивания материала. Поэтому с повышением дисперсности зерен усиливается эффект торможения дислокаций, что вызывает рост износостойкости. Этот вывод о величине зерна структуры является основополагающим и распространяется не только на структуру металлических матриц, но и на зерна твердой фазы (карбидов), которые она удерживает на изнашиваемой поверхности при микроударном воздействии.

В случае разрушения кристалла по линии скольжения сначала зарождаются усталостные трещины, они начинают развиваться и распространяться в соседнем кристалле, в направлении линии пересечения плоскости скольжения с верхней поверхностью кристалла. При мелкозернистом строении трещины чаще всего проходят через зерна, а не по их границам [32].

### 1.2.3. Влияние структуры покрытий, наплавленных порошковыми проволоками, на их абразивную износостойкость

По отношению к углероду в железоуглеродистых сплавах легирующие элементы можно разделить на две группы: элементы, не образующие карбиды, и карбидообразующие элементы, к которым относятся хром, марганец, вольфрам, молибден, ванадий, титан, ниобий, тантал и цирконий и др. В таблице 1.1 приведены данные по сопротивляемости легированных металлических матриц микроударному воздействию при абразивном изнашивании [24, 25].

Таблица 1.1

**Сопротивляемость структурных составляющих железоуглеродистых сплавов микроударному разрушению**

Структура	Сплав	НВ	Потери массы за 10 ч испытаний, мг
Феррит	Нелегированный	80	996,4
	Легированный:		
	хромом — 25%, молибденом — 2%	68 153	284,8 168,2
Аустенит	Никелевый — 25% (С — 0,82%)	170	218,3
	Никелевый — 9% (хром — 18%, С — 12%)	179	198,6
	Марганцевый — 12% (хром — 14%, С — 0,23%)	183	64,4
Перлит	Нелегированный	235	246,5
	Легированный:		
	хромом — 0,8%, никелем — 1,5%; никелем — 1,5%, молибденом — 0,8%;	248 255	204,8 198,2
	хромом — 1,0%, ванадием — 0,5%	241	242,3
Сорбит	Нелегированный	302	164,9
Троостит		430	98,5
Бейнит		460	44,2
Мартенсит (углерода бо- лее 1%)	Нелегированный	683	69
	Легированный:		
	хромом — 12%, ванадием — 0,8%;	627	82
	хромом — 12%, молибденом — 0,6%;	652	59
	хромом — 12%	683	75

Сравнивая данные таблицы 1.1 и рисунка 1.2, можно сделать вывод, что легирование значительно повышает износостойкость металлических матриц. При этом твердость матрицы зависит не только от твердости структуры матрицы, но и от дисперсности самих структур. Износостойкость мартенситной составляющей определяется содержанием в ней углерода: чем больше углерода, тем выше износостойкость стали. Заэвтектоидная сталь со структурой «мартенсит плюс избыточные карбиды» обладает меньшей износостойкостью, чем та же сталь с чисто мартенситной структурой. Наличие в структуре стали остаточного аустенита не снижает ее сопротивление абразивному изнашиванию, что объясняется превращением аустенита в высоколегированный мартенсит в объ-

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)