

УДК 621.791:621.192

## ДЕФЕКТЫ МЕТАЛЛОВ ПРИ НАПЛАВКЕ И НАПЫЛЕНИИ И НАДЕЖНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

канд. техн. наук, доц. В.Э. ЗАВИСТОВСКИЙ (Полоцкий государственный университет)

Представлены результаты исследований дефектов покрытий, полученных наплавкой и напылением, и их влияние на надежность восстановленных деталей машин.

Металлические покрытия представляют собой сложные многокомпонентные неравновесные системы, обладающие избыточной свободной энергией, обусловленной наличием в слоях большого количества микро- и макродефектов структуры в частицах присадочного материала. Важнейшими типами микродефектов являются точечные (вакансии, внедренные и примесные атомы), линейные (дислокации) и двумерные (границы зерен, двойников, раздела фаз). Макродефекты - поры и включения в порошковых композициях. Их существование непосредственно связано с границами раздела фаз *твердое тело - газ*. Микродефекты распределены с некоторой плотностью в окрестностях макродефектов и обеспечивают локальное термодинамическое равновесие системы *порошковый слой - подложка*. По мере нагревания системы в ней возникают сложные физико-химические процессы, направленные в соответствии с общими принципами термодинамики в сторону уменьшения избыточной свободной энергии. Интенсивность этих процессов возрастает с повышением температуры и существенно зависит от наследственных свойств наносимого порошка (наличие микро- и макродефектов, химически взаимодействующих реагентов и т.д.) [1]. На рис. 1 и 2 показаны форма и строение частиц порошка различных сплавов.

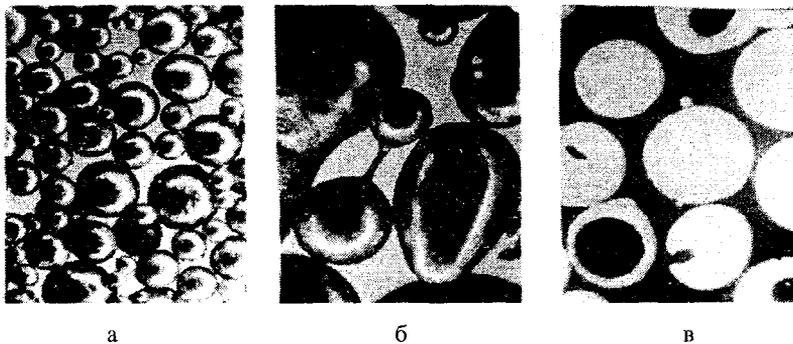


Рис. 1. Форма и строение частиц порошковых сплавов:  
а - фракция менее 200 мкм, ПГ-СП4; б - фракция 500 - 400 мкм, ПГ-СП2;  
в - внутренние поры, фракция 300 - 200 мкм, ПГ-СП3

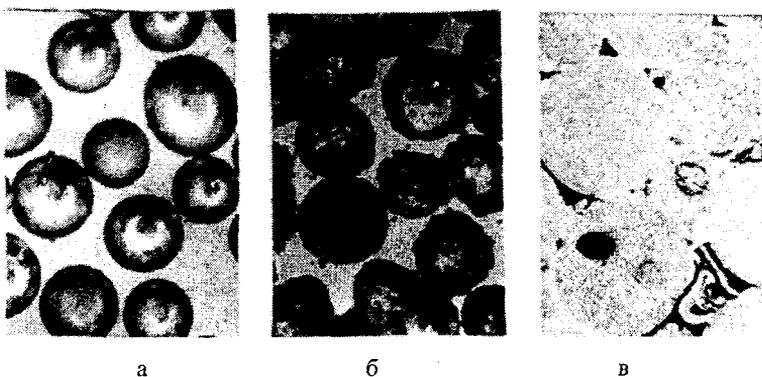


Рис. 2. Форма частиц порошка сплава ПГ-СП3:  
а - до наплавки; б - после нагрева до 800 °С; в - после нагрева до 950 °С

Покрытие, получаемое напылением, - это слоистый материал, состоящий из деформированных напыленных частиц, соединенных между собой по контактными поверхностям сварными участками. Напыленный слой формируется из мельчайших капелек металла сферической формы, покрытых снаружи окисной пленкой в момент удара их о поверхность материала детали. Капельки при ударе деформируются и в результате схватывания закрепляются на поверхности (рис. 3). Структура слоя, сформированного за один проход, неоднородна и определяется различными размерами и энергетическим состоянием -

температурой и скоростью частиц, находящихся в периферийной и центральной зоне двухфазового потока, состоящего из частиц порошка и газа. Образование покрытия последовательной укладкой множества деформирующихся частиц неизбежно приводит к появлению микропустот, в первую очередь на стыках частиц. Покрытие формируется в атмосфере, поэтому микропустоты заполняются газом, что ухудшает свойства границ. Вследствие большой шероховатости покрытия, быстрого растекания и кристаллизации частиц в зоне контактов с поверхностью ранее нанесенных частиц остаются дефекты и полости (рис. 4), которые образуются также вследствие выделения газов, растворенных в расплавленных частицах [2].

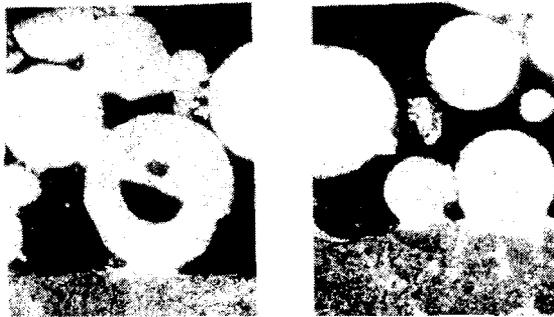


Рис. 3. Зона контакта основного металла и частиц порошка из самофлюсующегося сплава в начальный период их взаимодействия (x100)

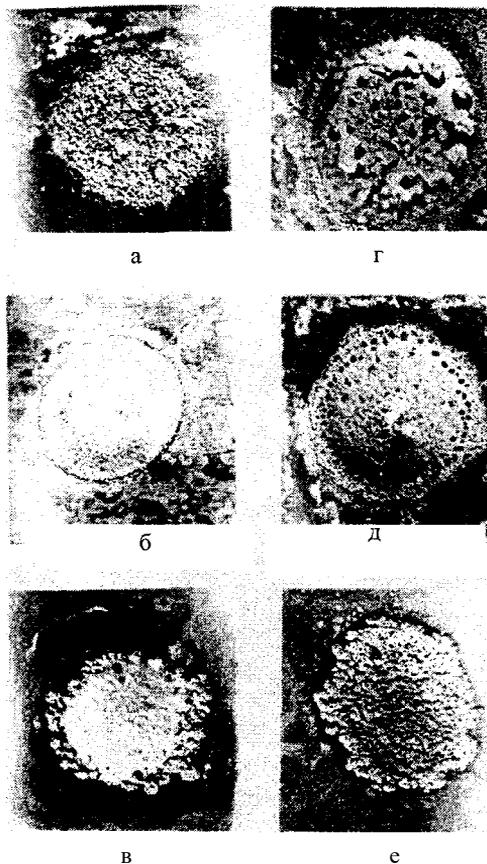


Рис. 4. Изменение поверхности образцов при нагреве сплава ПГ-СРЗ на подложку (Сталь 3)

Структура и свойства покрытия зависят от гранулометрического состава напыляемого порошка. С уменьшением размера частиц порошка улучшается заполнение покрытия: плотность его увеличивается, объем микропустот уменьшается, строение покрытия становится более однородным.

К числу дефектов напыленных покрытий относятся отслоение или вздутие покрытия из-за его плохой адгезии к основному металлу, трещины, сплошная пористость, низкая твердость, неоднородность структуры и др. В таблице приведены виды дефектов в покрытиях, напыленных самофлюсующимися сплавами с последующим оплавлением [3].

## Дефекты в покрытиях, напыленных самофлюсующимися сплавами с оплавлением

Дефекты	Характеристика и причины возникновения
Газовые раковины	Выделение газов при нагреве основного металла в процессе оплавления, применение основного металла, склонного к выделению газов при нагреве. Основные причины: некачественные отливки и участки некачественных сварных швов с высоким содержанием газа; некачественная очистка поверхности, наличие масла, жиров и т.п.
Вздутия	Плохая адгезия покрытия к основному металлу. Основные причины: некачественная очистка поверхности; выделение газа из основного металла
Трещины	Растрескивание покрытия в результате усадки. Основные причины: различие коэффициентов линейного расширения (сужения) в процессе оплавления покрытия и основного металла; недостаточный или неравномерный нагрев основного металла; недостаточно медленное охлаждение после оплавления; значительное расширение основного металла под влиянием закалки
Пригар	Перегрев покрытия при оплавлении. Основные причины: резкое изменение толщины основного металла на отдельных участках; неправильный контроль температурного режима
Брызги	Дефекты наплавленного покрытия, возникшие до его сплавления. Основные причины: наличие конгломератов частиц напыляемого материала на участках неудовлетворительной адгезии покрытия к основному металлу

Для газопламенного напыления часто используются порошки системы Ni-Cr-B-Si, которые являются самофлюсующимися. Покрытия имеют слоистую структуру, и свойства покрытий отличаются от свойств компактных материалов. Для покрытий характерны пониженная прочность сцепления на границах между частицами и слоями, обусловленная неполным схватыванием, а также повышенным содержанием оксидов, нитридов, пор и различных включений в пограничных областях; пористость, возникающая в результате газовыделения и кристаллизации частиц с высокими скоростями, а также выплеска материала покрытия при ударе частиц о подложку [4]. Наибольшей пористостью характеризуются поверхностные слои покрытия и слои, прилегающие к подложке. Покрытия имеют различную твердость и микротвердость по поверхности и глубине, неоднородный химический состав, большое количество составляющих микроструктуры. В отдельных частицах и во всем покрытии формируются значительные внутренние напряжения, приводящие к образованию микротрещин. Прочность сцепления газотермических покрытий с поверхностью определяется совместным влиянием структурных дефектов границы раздела и остаточными напряжениями в ее плоскости [5, 6]. Структурные дефекты возникают из-за неполного контакта деформированных напыленных частиц с напыляемой поверхностью и неполного развития физико-химических связей между контактирующими поверхностями. Остаточные напряжения обусловлены в основном различными теплофизическими и физико-механическими свойствами материалов покрытия и основы, а также разной их зависимостью от температуры (рис. 5 и 6).

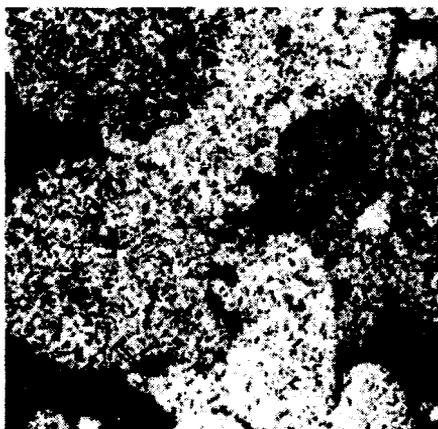


Рис. 5. Структура плазменного покрытия при напылении на холодную подложку (x200)

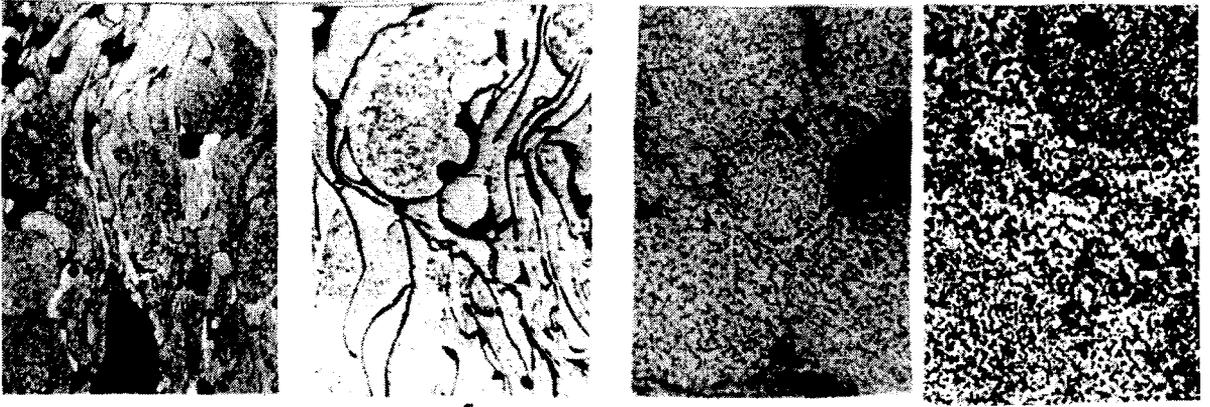


Рис. 6. Строение плазменных покрытий при подогреве подложки: а - до 150; б - до 400; в - до 600; г - до 800 °С

В процессе наплавки как в наплавленном металле, так и в околошовной зоне могут возникать дефекты, которые снижают эксплуатационную способность наплавленного металла [6 - 10]. Дефекты различают по месту расположения и причинам возникновения. К первой группе относят дефекты, образующиеся в связи с особенностями металлургических и тепловых процессов наплавки: трещины, поры, шлаковые включения и др. (рис. 7 и 8).



Рис. 7. Типичные изломы оплавленных образцов (фракция - 0,16 + 0,075 мм): а - с шлаковыми включениями; б - без шлаковых включений

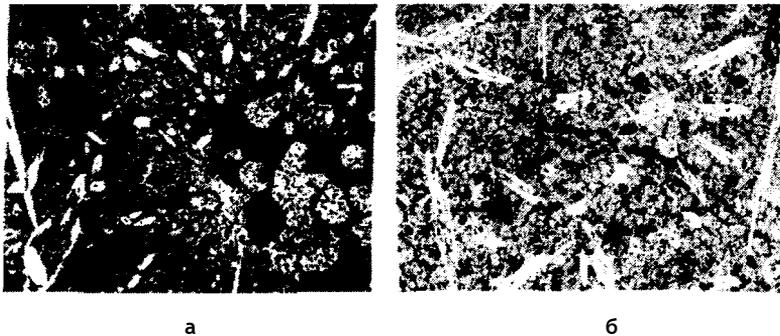


Рис. 8. Изменение плотности и структуры покрытия при нагреве (x60): а -  $T = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 5\text{ мин}$ ; б -  $T = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 20\text{ мин}$

Ко второй группе относят дефекты, возникающие из-за нарушений режима наплавки, неисправности оборудования, низкой квалификации персонала: подрезы, подвороты, наплывы, отслоение и др. (рис. 9).

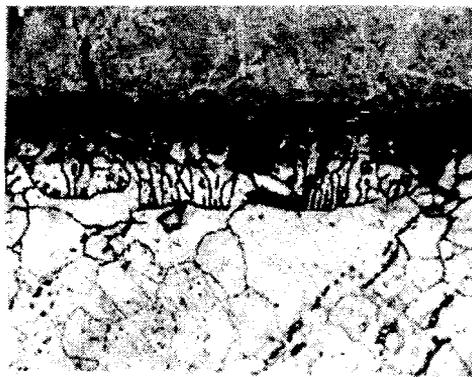


Рис. 9. Отслоение покрытия при светолучевой наплавке на массивную холодную подложку

Наиболее распространены при наплавке трещины. Их подразделяют на кристаллизационные, холодные и околошовные. Кристаллизационные трещины возникают в процессе первичной кристаллизации наплавленного металла, и их расположение, как правило, совпадает с направлением роста столбчатых кристаллитов. Физическая неоднородность металла покрытия связана с несовершенством его кристаллической решетки. Особенно много дефектов возникает при дендритной кристаллизации, характерной для наплавленного металла (рис. 10). Ветви дендритов имеют различную пространственную ориентацию, а кристаллиты - блочную структуру, усиливаемую из-за скопления между ветвями дендритов примесей и дислокаций. При наплавке кристаллизующийся металл находится под воздействием растягивающих напряжений, возникающих вследствие несвободной усадки наплавленного металла, который в процессе охлаждения подвержен пластической деформации. При кристаллизации некоторое время металл находится в твердожидком состоянии. Если нарастание напряжений опережает повышение пластичности металла, возникают межкристаллические разрушения. Если же процесс нарастания напряжения происходит тогда, когда металл уже прошел твердожидкое состояние и приобрел достаточную прочность и пластичность, то возникшие напряжения лишь вызовут пластическую деформацию и образование кристаллизационных трещин не произойдет [4, 7]. Формирование капли сплава ПГ-СР4 приведено на рис. 11.

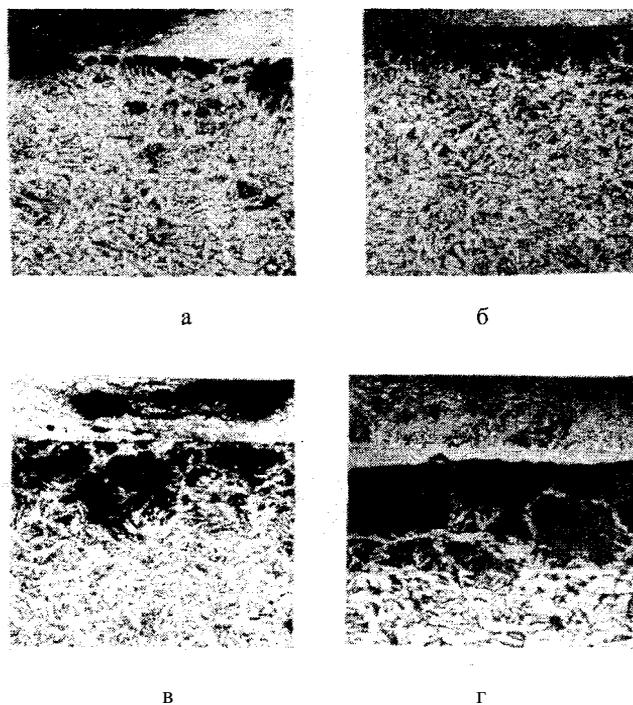


Рис. 10. Изменение диффузионной зоны на разных стадиях растекания (x200):  
 а - отсутствие диффузионной зоны вблизи периметра растекания ( $T = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ );  
 б - феррито-перлитная зона глубиной 70 мкм ( $T = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ );  
 в - перлитная зона глубиной 300 мкм ( $T = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ );  
 г - зона видманштеттовой структуры ( $T = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

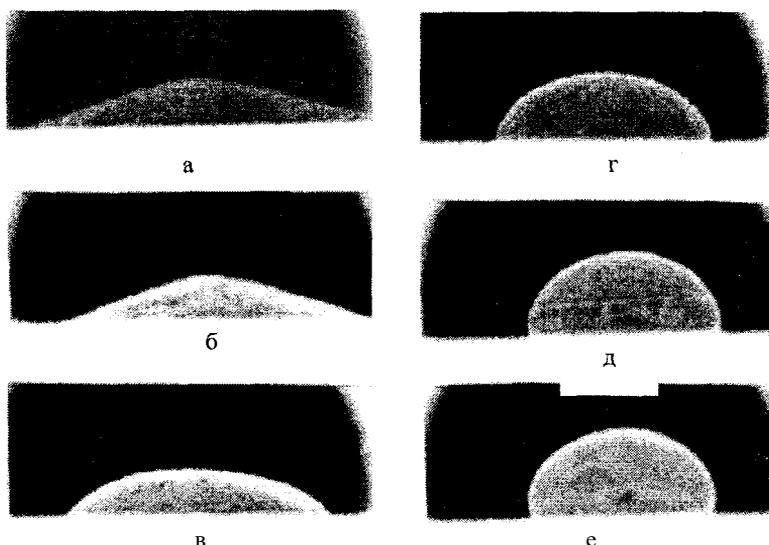


Рис. 11. Формирование капли сплава ПГ-СР4 на кварцевой подложке при температуре 1050 °С (скорость съемки 1 кадр через 5 с)

Холодные трещины в наплавленном металле образуются при сравнительно невысокой температуре ( $T = 200$  °С). Они возникают тогда, когда металл, казалось бы, уже приобрел высокие прочностные свойства. Характерная черта появления холодных трещин - замедленное их развитие в течение нескольких часов и даже суток. Затем при достижении определенной величины трещины развиваются мгновенно, взрывоподобно, с характерным звуковым эффектом. Холодные трещины возникают как по границам зерен, так и по телу зерна. Околошовные трещины подразделяют на горячие и закалочные. Горячие трещины при некоторых условиях образуются во время наплавки на участках сплавления и перегрева околошовной зоны. Трещины развиваются по границам зерен основного металла и могут распространяться в наплавленный слой. Образование горячих трещин в околошовной зоне объясняют [7] сосредоточением на границах зерен вредных примесей, образующих легкоплавкие включения и прослойки. Закалочные трещины в околошовной зоне появляются в результате возникновения напряжений, обусловленных образованием мартенсита и высоких давлений, создаваемых водородом, заполнившим микроскопические пустоты в кристаллических решетках.

Поры в наплавленном металле представляют собой округлые пустоты, расположенные отдельными группами или цепочками внутри металла и на его поверхности. Поры возникают в процессе первичной кристаллизации.

Шлаковые включения образуются вследствие плохой очистки от шлака поверхности предыдущих слоев при многопроходной наплавке; затекания шлака в несплошности металла, возникающие в результате подворотов, наплывов и других дефектов; применения электродов с чрезмерно тугоплавким покрытием; большой скорости наплавки и т.д. Размеры шлаковых включений могут быть от микроскопических до частиц диаметром несколько миллиметров [3,7]. Форма их бывает округлой и вытянутой.

Качество покрытия при наплавке по слою порошка под флюсом в значительной степени зависит от толщины порошкового слоя. При толщине слоя порошка более 6-9 мм нарушается устойчивость дуги, в наплавленном металле появляются такие дефекты, как наплывы и несплавления [11].

Детали машин и элементы конструкций обычно содержат как врожденные дефекты и трещины, так и возникшие при обработке, изготовлении и транспортировке [13]; все они подчиняются некоторой закономерности распределения по количеству и размерам. Это распределение в совокупности с локальным напряженным состоянием и средой определяют потенциальные центры возникновения трещины. Чаще всего трещина берет начало от какого-нибудь небольшого поверхностного дефекта детали по истечении инкубационного периода конечной продолжительности [12]. Затем трещина растет под совместным влиянием приложенной нагрузки и окружающей среды. После того как трещина достигла критической глубины, происходит быстрое разрушение. Долговечность детали равна суммарной продолжительности периодов возникновения и распространения трещины.

Отказ материала с покрытием в значительной степени определяется наличием дефектов в металле и материале покрытия, а также их взаимодействием с частицами присадочного материала [14 - 15]. Механическая обработка таких деталей приводит к изменениям структуры поверхностного слоя; ранее скрытые дефекты и поры выходят на поверхность, являясь очагами разрушения. Наличие дефектов обусловлено как технологией изготовления изделия, так и его эксплуатацией. Н.А. Махутов и др. предложи-

ли непровары, поры, несплавления и другие дефекты при расчетах показателей надежности рассматривать как трещины. Если обозначить критический размер дефекта  $a_c$ , размер дефекта в момент времени  $t - a_t$  и считать их фиксированными случайными величинами, то вероятность безотказной работы  $R(t)$  восстановленного материала с покрытием можно представить в виде вероятности

$$R(t) = 1 - F(t) = P\{a_t \leq a_c\} = \int_0^{\infty} [1 - F_t(a_t, Q_t)] f_c(a_c, Q_c) da_c,$$

где  $F(t)$  – функция распределения ресурса;  $f_c(a_c, Q_c)$  – плотность распределения критического размера дефекта;  $Q_c, Q_t$  – векторы параметров распределения, зависящие от времени  $t$  [17]. В качестве аппроксимирующей функции плотности распределения размера дефекта можно использовать: двухпараметрический закон Вейбулла – Гнеденко, распределение Эрланга, законы нормального и равномерного распределения и др. [16, 18].

**Выводы.** Размер критического дефекта как параметр, влияющий на надежность, можно найти через характеристики статической трещиностойкости. При этом функция риска  $h(t)$  определяется из выражения

$$h(t) = F'(t) / (1 - F(t)),$$

где  $F'(t)$  – производная функции распределения ресурса по времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант T01-088).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дорожкин Н.Н., Абрамович Т.М., Ярошевич В.К. Импульсные методы нанесения порошковых покрытий. - Мн.: Наука и техника, 1985. - 278 с.
2. Анциферов В.Н., Бобров Г.В., Дружинин Л.К. и др. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. - М.: Машиностроение, 1987. - 792 с.
3. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. - М.: Машиностроение, 1985. - 240 с.
4. Клименко С.А., Муковоз Ю.А., Полонский Л.Г. и др. Точение износостойких защитных покрытий. - Киев: Техніка, 1997. - 142 с.
5. Куприянов И.Л., Геллер М.А. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления. - Мн.: Наука и техника, 1976. - 234 с.
6. Витязь П.А., Ивашко В.С., Манойло Е.Д. и др. Теория и практика газопламенного напыления. - Мн.: Наука і тэхніка, 1993. - 295 с.
7. Шехтер С.Я., Резницкий А.М. Наплавка металлов. - М.: Машиностроение, 1982. - 71 с.
8. Ивашко В.С., Куприянов И.Л., Шевцов А.И. Электротермическая технология нанесения защитных покрытий. - Мн.: Наука і тэхніка, 1996. - 375 с.
9. Шипко А.А., Поболь И.Л., Урбан И.Г. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева. - Мн.: Наука і тэхніка, 1995. - 280 с.
10. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Оборудование и технология лазерной обработки материалов. - М.: Высшая школа, 1990. - 159 с.
11. Дорожкин Н.Н., Петюшев Н.Н. Дуговая газопорошковая наплавка. - Мн.: Беларусь, 1989. - 94 с.
12. Хетч Л., Рат Б. Методы поверхностной обработки высокопрочных сплавов с целью повышения их трещиностойкости: состояние и перспективы / Обработка поверхности и надежность материалов. - М.: Мир, 1985.-С. 121-148.
13. Завистовский В.Э. Механика разрушения и прочность материалов с покрытиями. - Новополоцк: Полоцкий гос. ун-т, 1999. - 144 с.
14. Завистовский В.Э. Физические основы расчета на надежность восстановленных деталей машин // Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование и технология изготовления. Сб. науч. тр. Вып. 1. В 3-х т. - Т. 2. - Мн.: УП «Технопринт», 2002. - С. 358 - 360.
15. Завистовский В.Э. Дефекты покрытий и надежность материала восстановленной детали // Машиностроение: Сб. науч. тр. Вып. 19. - Мн.: УП «Технопринт», 2003. - С. 78 - 83.
16. Филонов И.П., Медведев А.И. Вероятностно-статистические методы оценки качества в машиностроении. - Мн.: Тесей, 2000. - 128 с.
17. Махутов Н.А., Кокшаров И.И., Лелехин А.М. Применение численных методов расчета показателей надежности элементов конструкций с повреждениями // Проблемы прочности. - 1991. - № 5. - С. 3 - 8.
18. Завистовский В.Э. Обзор законов распределения случайных величин при расчетах надежности технических систем // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. - 2003. - Т. 2, №4.-С. 15-29.