

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БАРАНОВИЧСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

И. О. СОКОРОВ, Н. В. СПИРИДОНОВ,
М. В. НЕРОДА

**ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ
ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ
ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМ
НАПЫЛЕНИЕМ**

Монография

Рекомендовано к печати
редакционно-издательским советом университета

Барановичи
РИО БарГУ
2012

УДК 621(035.3)
ББК 34.5
С59

А в т о р ы:

И. О. Соколов, Н. В. Спиридонов, М. В. Нерода

Р е ц е н з е н т ы:

Л. М. Акулович, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологии металлов учреждения образования
«Белорусский государственный аграрный
технический университет»;

Н. А. Свидунович, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры материаловедения
и технологии материалов учреждения образования
«Белорусский государственный
технический университет»

Соколов, И. О.

С59

Технология упрочнения тяжело нагруженных деталей газотермическим напылением [Текст] : монография / И. О. Соколов, Н. В. Спиридонов, М. В. Нерода. — Барановичи : РИО БарГУ, 2012. — 183, [5] с. — 110 экз. — ISBN 978-985-948-552-0.

Книга содержит результаты теоретических и экспериментальных исследований физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик газотермических покрытий из композиционных материалов, а также определение оптимальных технологических параметров их нанесения на опорные поверхности тяжело нагруженных валов. Представлены закономерности изнашивания полученных покрытий в условиях фреттинг-коррозии и действующих высоких удельных нагрузок. Предложена технология получения покрытий с высокими эксплуатационными свойствами на опорных поверхностях тяжело нагруженных валов.

Издание рассчитано на научных и научно-технических работников, аспирантов и студентов технических специальностей.

Табл. 15. Рис. 64.

**УДК 621(035.3)
ББК 34.5**

ISBN 978-985-948-552-0

© Соколов И. О., Спиридонов Н. В., Нерода М. В., 2012
© БарГУ, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Раздел 1 Анализ условий эксплуатации валов и технологий их упрочнения	8
1.1 Условия работы валов бумагоделательного оборудования	8
1.2 Анализ влияния амплитуды относительного скольжения (смещения), частоты вибраций, нагрузки на фреттинг-коррозию и методы защиты	22
1.3 Материалы, применяемые для получения износостойких покрытий	32
1.4 Анализ технологий повышения износостойкости	39
Выводы	45
Раздел 2 Оборудование и методики, использованные в процессе проведения исследований	48
2.1 Оборудование и материалы, применяемые в исследованиях	48
2.2 Методики определения прочности сцепления и оценки остаточных напряжений	51
2.3 Методики изучения структуры, определения микротвёрдости, пористости и оценки трещинообразования покрытий	55
2.4 Методики определения износостойкости покрытий и их изнашивания при фреттинг-коррозии	59
2.5 Методика обработки экспериментальных данных	65
Раздел 3 Исследование и оптимизация составов композиционных материалов и технологических параметров газотермического напыления	70
3.1 Расчёт максимальной удельной нагрузки, действующей на опорную поверхность вала	70
3.2 Оптимизация составов композиций для напыления покрытий	80
3.3 Исследование и оптимизация режимов подготовки поверхности перед напылением	91
3.4 Исследование и оптимизация технологических параметров плазменного напыления подслоя	101

3.5 Исследование и оптимизация технологических параметров газопламенного напыления основного слоя	110
3.6 Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий	114
Выводы	130
Раздел 4 Исследование эксплуатационных параметров композиционных газотермических покрытий	132
4.1 Физико-математическая модель изнашивания газотермических покрытий при фреттинг-коррозии	132
4.2 Исследование изнашивания композиционных газотермических покрытий при фреттинг-коррозии	141
4.3 Комплексное исследование изнашивания газотермических покрытий при трении скольжения	146
4.4 Исследование влияния износостойкости на долговечность валов бумагоделательного оборудования после газотермического напыления	150
4.5 Разработка типового технологического процесса и внедрение результатов работы в промышленность	155
Выводы	164
Заключение	166
Резюме	169
Резюмэ	170
Summary	171
Список использованных источников	172

ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения надёжности машин и оборудования в условиях интенсификации производства, энерго- и ресурсосбережения ставит задачу создания новых технологических процессов и применения новых материалов.

Повышение износостойкости и коррозионной стойкости, антифрикционных свойств и сопротивления усталостным процессам поверхностей трения актуально для различных отраслей техники. Не менее важной является проблема упрочнения и восстановления крупногабаритных тяжело нагруженных быстроизнашивающихся деталей, на замену которых ежегодно расходуются значительные средства.

Одним из эффективных способов повышения долговечности деталей, работающих в условиях трения, является напыление на их рабочие поверхности прочных износостойких газотермических покрытий, позволяющих экономить дорогостоящие легированные и другие дефицитные материалы, повышать ресурс и надёжность механизмов, снижать энергоёмкость производства, успешно решать проблемы восстановительного ремонта в целях повторного использования изношенных деталей.

Значительный вклад в развитие упрочняющих технологий, основанных на применении газотермического напыления, внесли учёные М. Thorpe (М. Торп), J. P. Celis (Дж. П. Целис), R. Smith (Р. Смит), Ю. С. Борисов, В. В. Кудинов, Н. Н. Дорожкин, Н. В. Спиридонов, И. Л. Куприянов и другие, что позволило расширить область применения газотермического напыления и создать различные технологии, например высокоскоростное газопламенное напыление, подводное плазменное напыление, газотермическое напыление в динамическом вакууме и в контролируемой атмосфере, плазменно-лазерное напыление. Кроме того, созданы материалы, обладающие высокими физико-механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками, такие, как самофлюсующиеся материалы. Но их применение эффективно при последующем оплавлении напылённых покрытий, которое значительно повышает прочность их сцепления с основой. Однако оплавление не применимо для крупногабаритных тяжело нагруженных деталей вследствие ряда причин: 1) трудности прогрева детали; 2) возникающие остаточные напряжения различного рода, приводящие к искажению геометрических размеров детали, возникновению и развитию усталостных трещин, что ведёт к поломке детали, отслоению и растрескиванию покрытий.

Важным показателем качества газотермических покрытий является их прочность сцепления с основой, и сегодня большое внимание уделяется повышению данного показателя.

Основным условием, определяющим высокую прочность сцепления газотермических покрытий, является протекание химического и диффузионного взаимодействия материала напыляемых частиц с основой. На эти процессы значительное влияние оказывает предварительное активирование поверхности основы: увеличение температуры, дефектности структуры; напыление подслоя и др.

Однако остаётся неясным влияние состояния поверхности основы и новых композиционных материалов на кинетику реакции и прочность сцепления в конкретных технологических процессах, что сдерживает развитие технологии газотермического напыления для крупногабаритных тяжело нагруженных деталей.

Поэтому создание для упрочнения таких деталей новых композиционных материалов, обеспечивающих высокие эксплуатационные свойства и прочность сцепления покрытия с основой, а также разработка технологических процессов их напыления без последующей термической обработки является актуальной задачей в области повышения ресурса крупногабаритных тяжело нагруженных деталей.

Наиболее характерными из таких деталей являются различные валы бумагоделательных машин (далее — БДМ). Масса этих валов достигает десятков тонн при стоимости до нескольких десятков тысяч долларов США. Опорная поверхность лимитирует срок службы таких валов. Сопряжения «опорная поверхность вала — втулка подшипника», являясь номинально неподвижными (создаётся натяг), вследствие воздействия вибраций и высоких удельных нагрузок (от нескольких десятков до нескольких сотен МПа) подвергаются фреттинг-коррозии. Исследование физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик новых композиционных покрытий в условиях фреттинг-коррозии является актуальной проблемой, имеющей как научное, так и практическое значение.

В работе проанализированы условия работы валов БДМ, типовые виды их изнашивания и повреждения и обоснована возможность применения газотермического напыления при упрочнении/восстановлении крупногабаритных тяжело нагруженных валов, работающих в условиях фреттинг-коррозии, разработаны и оптимизированы составы композиционных материалов, обеспечивающие максимальную прочность сцепления при упрочнении тяжело нагруженных валов бумагоделательного оборудования, исследованы и оптимизированы режимы подготовки поверхности и технологические параметры процесса газотермического напыления для получения покрытий с прочностью сцепления, обеспечивающей работоспособность упрочнённых тяжело нагруженных валов, исследованы физико-механические и триботехнические свойства композиционных газотермических покрытий при фреттинг-коррозии.

Изучение и моделирование изнашивания при фреттинг-коррозии композиционных газотермических покрытий в условиях высоких удельных нагрузок позволило определить эффективные технологические параметры газотерми-

ческого напыления, подготовки поверхности под напыление и составы композиционных материалов для обеспечения износостойкости покрытий и их высокой прочности сцепления с основой.

Исходя из вышесказанного, целью настоящей работы является повышение эксплуатационных свойств опорных поверхностей тяжело нагруженных валов, работающих в условиях фреттинг-коррозии, газотермическим напылением композиционных покрытий на примере валов БДМ.

В процессе исследований решались следующие задачи: 1) определение оптимальных с точки зрения физико-механических свойств составов композиций для напыления; 2) оптимизация параметров напыления разработанных композиций по критерию обеспечения максимальной прочности сцепления; 3) исследование физико-механических свойств полученных покрытий; 4) сравнение износостойкости покрытий из разработанных композиций и наиболее распространённого из оплавленного самофлюсующегося порошка на основе никеля ПГ-СР4, а также со сталью 45; 5) исследование процесса изнашивания напылённых покрытий в условиях фреттинг-коррозии.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ИХ УПРОЧНЕНИЯ

1.1 Условия работы валов бумагоделательного оборудования

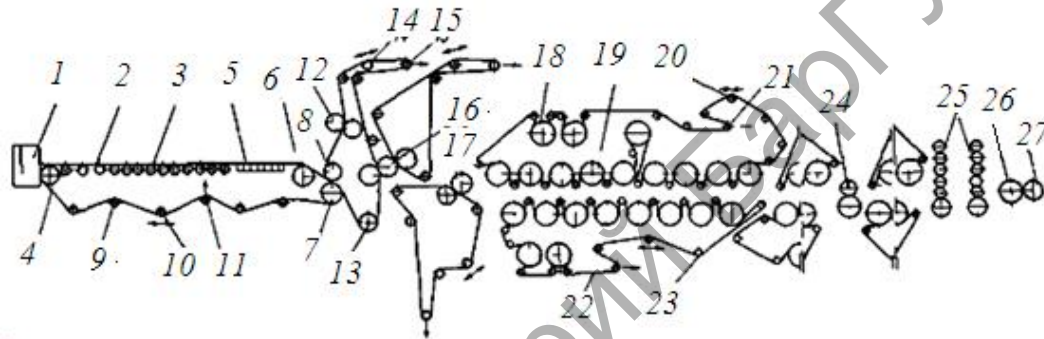
В технологическом процессе бумажного производства БДМ является основным агрегатом. На ней производится отлив и формование бумажного полотна, прессование, сушка и предварительная, а иногда и окончательная отделка бумаги [1].

Различают два типа БДМ: плоскосеточные и круглосеточные. На плоскосеточной машине бумажное полотно отливается и формируется на движущейся бесконечной металлической сетке, на круглосеточной — на сетке, натянутой на вращающийся цилиндр. По схеме и конструкции к БДМ близки картоноделательные машины и пресспаты. В настоящее время для производства бумаги и картона применяются преимущественно плоскосеточные машины.

БДМ (рис. 1.1) состоит из сеточной, прессовой и сушильной частей, каландра, наката и привода машины. К БДМ относят и вспомогательное оборудование: металлические бассейны для аккумуляции массы, регуляторы и контрольно-измерительные приборы, аппараты для очистки массы (песочницы, очистители и узлоловители), насосы для подачи массы и воды, вакуумные насосы, аппаратуру для переработки брака, компрессоры, оборудование для циркуляционной смазки, подачи воздуха для вентиляции и др.

Основными параметрами, характеризующими БДМ, являются скорость и ширина вырабатываемой бумаги, видом которой оба параметра и обусловлены.

Наиболее широкими и быстроходными являются машины, предназначенные для выработки газетной бумаги. Ширина бумажного полотна на них достигает 6 720...8 400 мм, скорость по приводу 900...1 000 м / мин, а суточная производительность 500 т.



1 — напорный ящик; 2 — сетка; 3 — грудной вал; 4 — регистровый валик; 5 — отсасывающий ящик; 6 — гауч-вал; 7 — головной вал; 8 — пересасывающее устройство; 9 — сетководущий валик; 10 — правительный валик; 11 — натяжной валик; 12 — сукномойка; 13 — отсасывающий вал; 14 — правительный валик; 15 — натяжной валик; 16 — вертикально-сдвоенный пресс; 17 — второй пресс; 18 — сукносушильный цилиндр; 19 — сушильный цилиндр; 20 — правительный валик; 21 — натяжной валик; 22 — сукно; 23 — сукноведущий валик; 24 — полусырой каландр; 25 — каландр с двумя шестивальными батареями; 26 — цилиндр наката; 27 — наматываемый рулон бумаги

Рисунок 1.1 — Схема бумагоделательной машины

При этом длина машины составляет 100...115 м, вес — 3 000...4 500 т, а потребляемая мощность для привода — 3 000...5 000 кВт. В настоящее время изготавливаются БДМ шириной 10 000 мм и 12 000 мм.

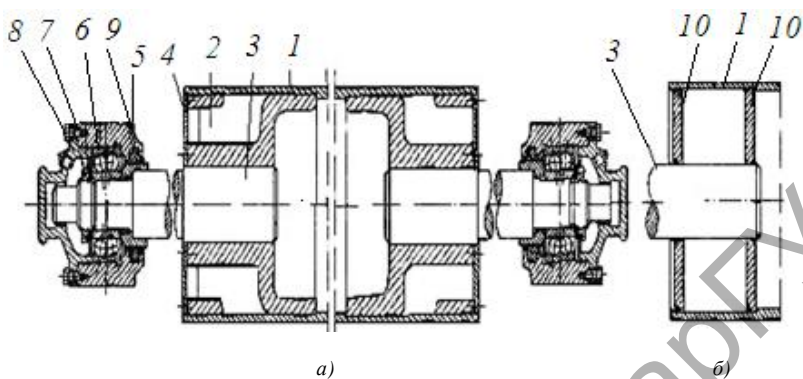
Современная высокоскоростная БДМ содержит до 250...300 валов и валиков (не считая сушильных цилиндров) различного назначения. К валам предъявляются очень жёсткие специфические требования, главными из которых являются высокая динамическая уравновешенность и по возможности минимальный прогиб. При этом следует учесть, что вес отдельных валов достигает 50...170 т при расстоянии между центрами подшипниковых опор до 10 000 мм [1—5].

Валы БДМ, конструктивные особенности которых в основном зависят от их назначения, можно подразделить на следующие основные виды: трубчатые, литые (пустотелые и сплошные), трубчатые перфорированные, гранитные, сетчатые и набивные.

Валы БДМ (регистражные, сетководные, сукководные, бумаговедущие, тамбурные, несущие валы продольно-резательных станков, тяговые валы бумагорезательных машин и др.) преимущественно трубчатые. Их диаметр достигает 500 мм (грудного — до 1 000 мм).

Трубчатый вал (рис. 1.2, а) представляет собой тонкостенную трубу из стали, латуни, алюминия или иного металла. По концам её обычно запрессованы чугунные патроны, а в них — стальные цапфы. Вместо чугунных патронов применяются также стальные диски (см. рис. 1.2, б), привариваемые к трубе, что уменьшает вес и облегчает уравновешивание валов.

Литой пустотелый вал (рис. 1.3) состоит из чугунной (реже стальной) отливки, в которую по концам запрессованы стальные цапфы. Диаметр валов такого типа — 400...1 000 мм, а толщина стенки — 30...150 мм. Литые пустотелые валы по сравнению с трубчатыми обладают значительно большей жёсткостью и прочностью, но вес их, естественно, значительно больше. Литыми пустотелыми являются нижние, а иногда и верхние валы обычных прессов БДМ.

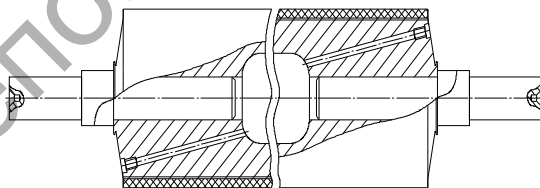


- a* — с чугунным патроном; *б* — со сварным патроном (дисками);
 1 — труба; 2 — патрон; 3 — цапфа; 4 — щиток; 5 — корпус подшипника;
 6 — подшипник качения; 7 — гайка; 8 — крышка подшипника;
 9 — войлочное уплотнение; 10 — диск сварного патрона

Рисунок 1.2 — Вал трубчатый



a)



б)

- a* — фотография чугунного каландрового вала прессовой части «БДМ-462»; *б* — схема вала со стальными цапфами

Рисунок 1.3 — Вал литой пустотелый

В литых сплошных валах цилиндры отлиты заодно с цапфами. За рубежом находят применение двухслойные валы со стальным внутренним сердечником и отбеленным наружным слоем из чугуна. Диаметр литых сплошных валов находится в пределах 350...1 100 мм.

При расчёте валов учитываются следующие силовые факторы: собственный вес, равнодействующая сила натяжения сетки, сукна и бумаги, давление вышележащего вала (валов), а в некоторых случаях давление дополнительного прижима.

Общая нагрузка $Q_{\text{общ}}$ вала от собственного веса G_c и равнодействующей натяжения Q_z ветвей сетки (сукна, бумаги) равна геометрической сумме сил [1; 5] и рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{общ}} = \sqrt{Q_z^2 + G_c^2 + 2Q_z G_c \cdot \cos \gamma},$$

где γ — угол между равнодействующей натяжения ветвей и вертикалью.

Ввиду симметричности нагружения вала реакции опор R_A и R_B равны между собой:

$$R_A = R_B = \frac{Q_{\text{общ}}}{2} = \frac{q_0 b}{2},$$

где $\frac{q_0 b}{2}$ — интенсивность равномерно распределённой нагрузки;

b — длина рабочей сетки вала.

Рассмотрим обычный пресс. Он состоит из двух валов: нижние валы, неотсасывающие, представляют собой пустотелые чугунные цилиндры, облицованные резиной, с запрессованными стальными цапфами; верхние — чугунные пустотелые, покрытые слоем твёрдой кварцевой резины, по конструкции аналогичны нижним валам [1].

Верхний вал опирается на нижний и дополнительно нагружается для создания необходимого давления между валами. Линейное давление между валами первого обычного пресса находится в пределах 20...25 Н / мм.

Верхний вал обычного прессы по отношению к нижнему смещён в сторону, противоположную ходу бумаги, на 50...120 мм, ввиду этого давление на бумажное полотно постепенно увеличивается и достигает максимума по линии касания валов.

При расчёте прессовых валов можно пренебречь натяжением сукна, нагружающего нижний вал и разгружающего верхний (в обычных прессах), давлением шабера на верхний вал, а также окружным усилием, передаваемым с нижнего вала на верхний для его вращения.

Необходимое линейное давление между прессовыми валами создаётся собственным весом верхнего вала и усилием дополнительного прижима, передаваемого на подшипники верхнего вала.

Рассмотрим вначале случай, когда продольные оси валов расположены в одной вертикальной плоскости (рис. 1.4, а). Если бомбировка валов соответствует их прогибу и усилия дополнительного прижима с лицевой и приводной сторон равны между собой, то линейное давление q , Н/мм, будет равномерным по всей длине рабочей части вала [1; 6; 7] и определяться по формуле

$$q = \frac{G_{\text{в.в}} + P}{b},$$

где $G_{\text{в.в}}$ — вес верхнего вала (с подшипниками), Н;

P — суммарное усилие дополнительного прижима с лицевой и приводной сторон, Н.

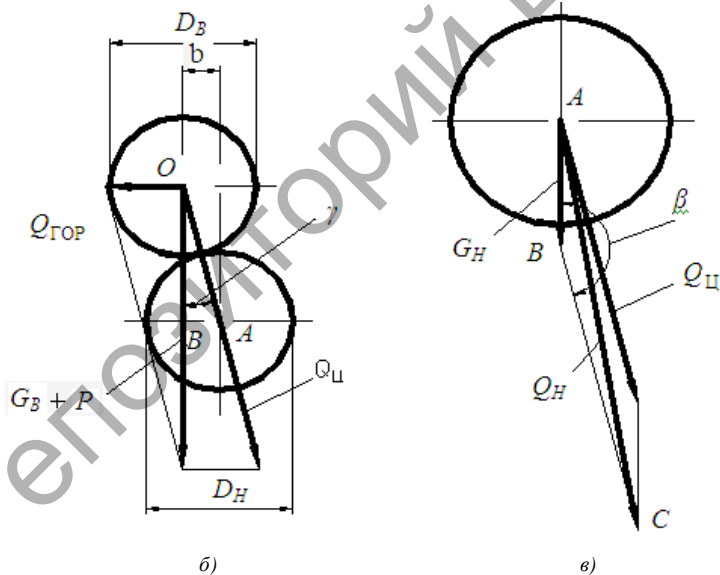
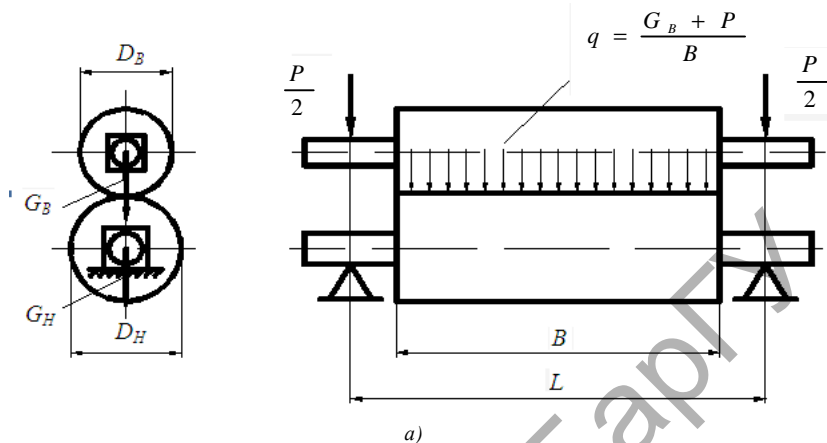
Нагрузка на оба подшипника нижнего вала $Q_{2\text{н}}$ равна

$$Q_{2\text{н}} = G_{\text{н.в}} + G_{\text{в.в}} + P = G_{\text{н.в}} + qb,$$

где $G_{\text{н.в}}$ — вес нижнего вала, Н.

Нагрузка на оба подшипника верхнего вала $Q_{2\text{в}}$, опирающегося на нижний, равна усилию дополнительного прижима P и вычисляется по формуле

$$Q_{2\text{в}} = P = qb - G_{\text{в.в}}.$$



a — валы расположены в одной плоскости; b — в двух вертикальных плоскостях;
 e — общая нагрузка на подшипники нижнего вала

Рисунок 1.4 — Схема нагрузки на валы прессы

Обычно валы прессов расположены в двух вертикальных плоскостях (см. рис. 1.4, б). С достаточной для расчёта точностью можно принять, что рычаги, на которых закреплён верхний вал, расположены горизонтально. Тогда результирующую веса верхнего вала $G_{в.в}$ и усилия P дополнительного прижима можно разложить на две составляющие: давление между валами, направленное по линии соединения центров нижнего и верхнего валов, $Q_{ц}$; нагрузка в горизонтальной плоскости вдоль рычагов $Q_{гор}$, вычисляемая по формуле

$$Q_{гор} = (G_{в.в} + P) \operatorname{tg} \gamma = Q_{ц} \cdot \sin \gamma,$$

где γ — угол между вертикальной плоскостью и линией, соединяющей центры валов.

Из треугольника АОВ (см. рис. 1.4, б) $\sin \gamma$ определяем по формуле

$$\sin \gamma = \frac{2\Delta m}{D_{н} + D_{в}},$$

где Δm — величина смещения между валами по горизонтали, мм;

$D_{н}$ и $D_{в}$ — диаметры верхнего и нижнего валов соответственно, мм.

Давление между валами, направленное по линии соединения центра нижнего и верхнего валов, $Q_{ц}$, вычисляем по формуле

$$Q_{ц} = qb = \frac{G_{в.в} + P}{\cos \gamma}.$$

Из уравнения следует, что при смещённом расположении валов давление $Q_{ц}$ между ними незначительно увеличивается.

Нагрузка на оба подшипника нижнего вала $Q_{2н}$ (см. рис. 1.4, в) равна

$$Q_{2н} = \sqrt{G_{н.в}^2 + G_{ц}^2 - 2G_{н.в} Q_{ц} \cdot \cos \beta} = \sqrt{G_{н.в}^2 + Q_{ц}^2 + 2G_{н.в} Q_{ц} \cdot \cos \gamma}.$$

Нагрузка на оба подшипника верхнего вала $Q_{2в}$ составляет

$$Q_{2в} = \sqrt{P^2 + Q_{гор}^2}.$$

Реакция опоры R вала определяется по формуле

$$R = \frac{\sqrt{G_{н.в}^2 + Q_{ц}^2 + 2G_{н.в} \cdot Q_{ц} \cdot \cos \gamma}}{2}. \quad (1.1)$$

Рассчитав по выражению (1.1) реакцию опоры R для валов различной массы, можно определить, что её величина достигает десятков тысяч ньютонов. Однако для определения работоспособности таких валов с защитными покрытиями целесообразно определять удельную нагрузку, действующую на опорную поверхность. Номенклатуру деталей, для которых возможно применение газотермического напыления (плазменного, газопламенного) без последующего оплавления, можно определить исходя из того, что прочность сцепления покрытий с основой $\sigma_{сц}$ должна превышать максимальную удельную нагрузку p_{max} , т. е. $\sigma_{сц} > p_{max}$. Для валов, удельная нагрузка которых превышает прочность сцепления, необходимо применять источники концентрированной энергии (плазменные, микроплазменные, лазерные) для повышения прочности сцепления покрытия с основой, что не всегда эффективно с точки зрения дороговизны оборудования и проблем, связанных с нагревом крупногабаритных деталей: возникающие остаточные напряжения могут привести к деформации детали и её поломке. Поэтому для гарантии работоспособности вала с покрытием очень важно правильно определить максимальную удельную нагрузку [7].

Вибрации, возникающие в механизмах и машинах, оказывают негативное влияние на точность работы механизмов, снижают долговечность работы, технологические и эксплуатационные характеристики машин.

В современной науке и технике придаётся большое значение борьбе с причинами возникновения такого рода колебаний. В частности, в работе БДМ возникающие вибрации валов оказывают значительное влияние на процесс изнашивания в местах

контакта с элементами подшипников качения, приводя к относительному проскальзыванию элементов сопряжений в номинально неподвижных соединениях и знакопеременному циклическому нагружению. В результате происходит разрушение окисных плёнок, образование локальных центров схватывания, разрушение микровыступов, которые зачастую, окисляясь, превращаются в абразив относительно контактирующих поверхностей в сопряжении. Данный вид разрушения контактирующих поверхностей называется фреттинг-коррозией [6; 8].

Среди ряда источников колебания механической системы (частей и узлов) БДМ следует выделить опорные подшипники качения валов. Подшипники качения способствуют возбуждению вибраций с высокочастотными и низкочастотными спектрами, которые являются следствием колебаний деталей подшипников. Причем высокочастотный спектр в основном определяет шумность подшипника, а низкочастотный является источником возмущений механической системы (горизонтально вращающийся вал на двух опорах) [9; 10].

При отсутствии дисбаланса данная механическая система под влиянием параметрических колебаний, создаваемых подшипниками качения, будет иметь периодически меняющиеся перемещения.

Перемещение у центра вала, горизонтально расположенного в подшипнике, под действием силы тяжести будет меняться в зависимости от того, расположено ли внутреннее кольцо подшипника на одном теле качения (рис. 1.5, а) или на двух (см. рис. 1.5, б).

Если принять, что контактирующие тела (внутреннее, наружное кольцо и шарики) являются абсолютно жёсткими, можно с некоторым приближением определить перемещение у [10]:

а) при положении на одном шарике — $y = \frac{e}{2}$;

б) при положении на двух шариках —

$$y = \frac{e}{2 \cos\left(180^\circ/z_n\right)};$$

где e — величина зазора в подшипнике;

z_n — число тел качения в подшипнике.

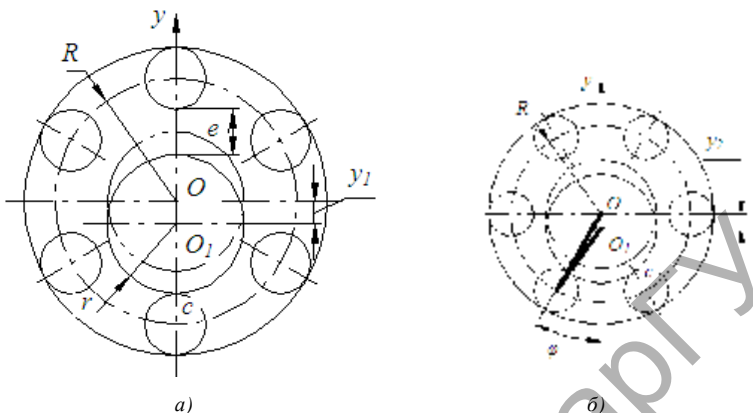


Рисунок 1.5 — Схема расположения внутреннего кольца подшипника

Равновесное положение вала периодически меняется, в связи с чем на вал действует периодическая возмущающая сила, вызывающая колебания системы.

Если предположить, что тела качения перекатываются без скольжения, то частота колебаний, передаваемых на вал со стороны подшипника, равна числу тел качения, проходящих в секунду через направление действующей силы (рис. 1.6).

Были проведены исследования [10], в результате получены зависимости для определения частоты возмущающей силы $f_{\text{возм}}$, действующей на вал со стороны подшипников, которые вычисляются по формуле

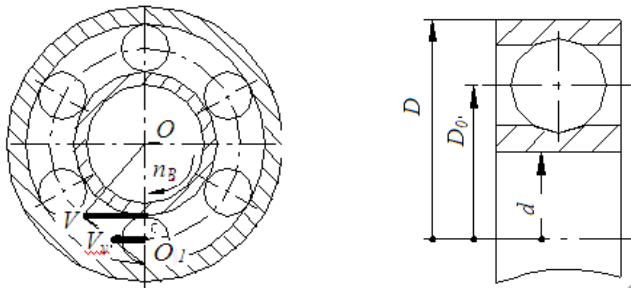
$$f_{\text{возм}} = a c z_n n_{\text{вр}},$$

где a — число рядов, имеющих относительный сдвиг осей тел качения;

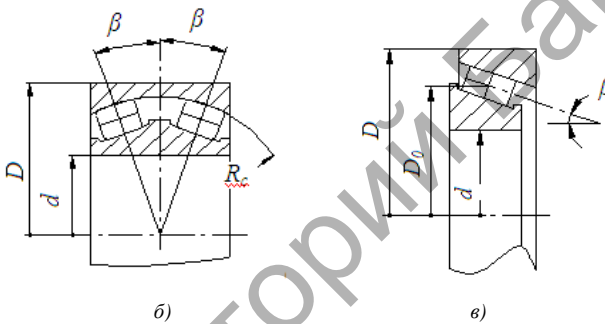
c — коэффициент, зависящий от линейных размеров подшипника;

z_n — число тел качения (для многорядных — число тел качения в одном ряду);

$n_{\text{вр}}$ — частота вращения вала, об / мин.



а)



б)

в)

а — шариковые подшипники; б — сферические подшипники;
в — конические подшипники

Рисунок 1.6 — Подшипники качения

При вычислении коэффициента, зависящего от линейных размеров подшипника, для радиальных шариковых и роликовых подшипников c_1 [10] (см. рис. 1.6, а) используется формула

$$c_1 = \frac{D_0 - d}{2 \cdot 60 D_0},$$

где D_0 — средний диаметр расположения центров тел качения.

Для сферических подшипников c_2 (см. рис. 1.6, б) применяется выражение

$$c_2 = \frac{D_{\text{сф}} - 2d}{2 \cdot 60 \cdot (D_{\text{сф}} - d)},$$

где $D_{\text{сф}}$ — диаметр сферы наружного кольца подшипника.

Для конических подшипников c_3 (см. рис. 1.6, в) вычисление проводится по формуле

$$c_3 = \frac{D_0 - d \cos \beta}{2 \cdot 60 D_0},$$

где β — угол наклона оси тел качения.

Полученная зависимость частоты возмущения $f_{\text{возм}}$ имеет место для подшипников с простым и цельным сепаратором, когда тела качения одного ряда фиксированы относительно другого ряда. Для двухрядных подшипников с составным сепаратором возможны изменения частоты возмущения. Появление фазы сдвига одного сепаратора относительно другого приводит к удваиванию частоты возмущений со стороны подшипника. При этом сдвиг t_i меняется в пределах $0 \leq t_i \leq S/2$, где S — шаг тел качения в одном ряду. В промежуточных положениях t_i колебания вала будут происходить с удвоенной частотой, но с разными периодами.

В механической системе может быть получен спектр частот возмущений f по формуле

$$f = m f_{\text{возм}},$$

где m — число подшипников в механической системе, равное 1, 2, 3, ..., n ;

$f_{\text{возм}}$ — частота возмущений со стороны одного подшипника.

Из анализа условий работы деталей БДМ можно сделать вывод о том, что на изнашивание трибопар, таких, как «опорная поверх-

ность вала — буксовая втулка (или кольцо подшипника)», оказывает немаловажное влияние процесс фреттинг-коррозии. Так как указанные сопряжения являются номинально неподвижными, при воздействии на них высоких удельных нагрузок и вибраций, передаваемых, в частности, от подшипников качения, в этих соединениях происходят относительные знакопеременные (силы инерции при запуске/остановке машины, действие крутящих моментов от натяжения сукна) колебательные перемещения контактирующих поверхностей, что приводит к разрушению как оксидных плёнок, так и поверхностных слоёв. Образующиеся продукты износа, окисляясь, превращаются в абразив. Кроме того, в номинально неподвижных соединениях затруднён вывод продуктов износа.

Вышесказанное свидетельствует о том, что на разрушение опорных поверхностей валов первостепенное влияние оказывает фреттинг-коррозия (рис. 1.7).



1 — опорная поверхность вала БМД; 2 — следы фреттинг-коррозии

Рисунок 1.7 — Пример повреждения опорной поверхности вала БМД при фреттинг-коррозии

1.2 Анализ влияния амплитуды относительного скольжения (смещения), частоты вибраций, нагрузки на фреттинг-коррозию и методы защиты

Термин *фреттинг* используется для обозначения малого колебательного скольжения между поверхностями двух контактирующих тел. Амплитуда такого движения обычно составляет 1...100 мкм. Изнашивание, возникающее при данном движении, называют *фреттинг-изнашиванием*, различая два его вида в зависимости от механических факторов и факторов, связанных с окружающей средой [11]. Если повреждение при фреттинге вызвано циклическим нагружением, стимулирующим появление поверхностных усталостных трещин, в конечном итоге приводящих к катастрофическому разрушению, то используют термин *фреттинг-усталость*. Вид фреттинга, при котором преобладают химические реакции, получил название *фреттинг-коррозии*. Как правило, оба типа фреттинга протекают одновременно. Циклическое микроперемещение вызывает разрушение защитной (например, оксидной) плёнки, покрывающей поверхность металла. Обнажившийся металл легко окисляется, а продукты окисления могут действовать как абразив, приводя к повреждению поверхности.

Относительное скольжение является необходимым условием образования фреттинг-коррозии. При постоянной частоте колебаний изменение амплитуды относительного скольжения приводит к изменению скорости относительного перемещения поверхностей, что может сказываться на условиях трения. Это, в свою очередь, может привести к изменению интенсивности развития фреттинг-коррозии [12].

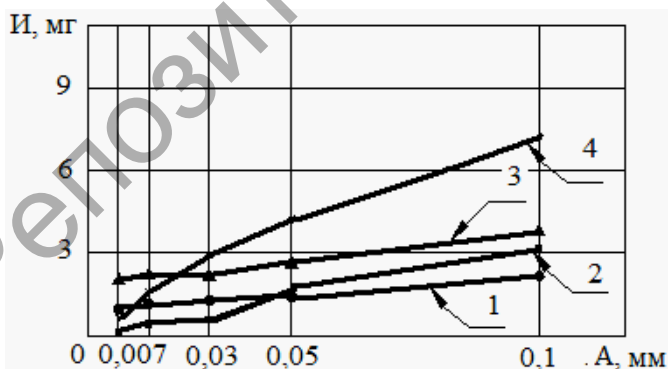
Некоторые экспериментальные данные показывают, что фреттинг-коррозия начинается при весьма малых величинах перемещения. Так, G. A. Tomlinson [13; 14] отмечает, что повреждение поверхности наступает даже тогда, когда относительное перемещение составляет несколько межатомных расстояний. Однако часть исследований проводилась и при больших амплитудах (до 2 мм).

При анализе интенсивности фреттинг-коррозии важно установить границу значения амплитуд, которая определяла бы специфику условий разрушения поверхности при фреттинг-коррозии по сравнению с износом при обычном трении скольжения.

Авторами [11] исследовалось влияние амплитуд 0,007...0,100 мм на интенсивность износа некоторых материалов в условиях вибраций при удельных нагрузках 2 и 10 МПа. Износ для каждой амплитуды соответствует постоянному количеству циклов колебаний ($250 \cdot 10^3$ циклов). Для нагрузки 2 МПа амплитудные зависимости износа исследованных материалов приведены на рисунке 1.8.

Проанализировав полученные данные, авторы сделали вывод, что (независимо от природы материалов и удельных нагрузок) износ при фреттинг-коррозии прямо пропорционален величине амплитуды относительного скольжения в исследуемом диапазоне значений. Скорость изменения износа с ростом амплитуды для разных материалов неодинакова и зависит от удельной нагрузки.

Для получения более объективной информации авторы [11] привели износ при различных амплитудах скольжения к постоянному пути скольжения. Приведённый износ характеризует интенсивность разрушения поверхности в зависимости от амплитуды скольжения. Результат пересчёта износа к $1 \cdot 10^3$ м пути показан на рисунке 1.9.



1 — сталь 1Х18Н9Т; 2 — сталь 45 закалённая; 3 — бронза БрАЖН9-4-1; 4 — сталь 45 нормализованная

Рисунок 1.8 — Зависимость износа (И) от амплитуды относительного скольжения (А)

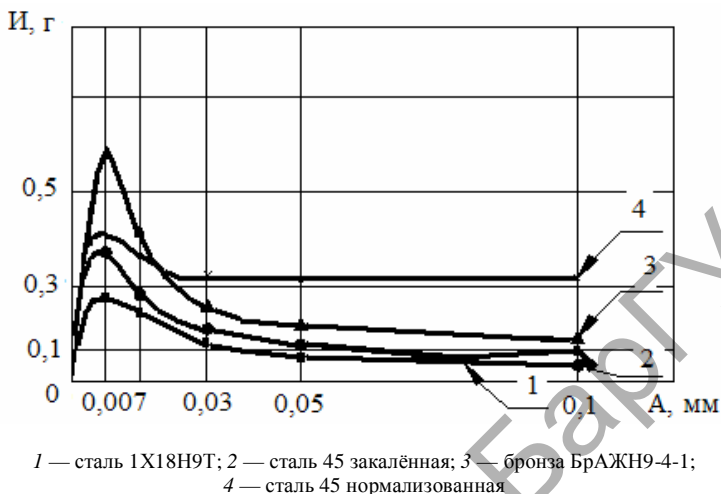


Рисунок 1.9 — Зависимость приведённого износа от амплитуды относительного скольжения

Исследования поверхностей трения показали, что с увеличением амплитуды скольжения интенсифицируются процессы схватывания, причём с повышением нагрузки активизация указанных процессов начинается при более низких амплитудах [11]. Следовательно, можно заключить, что при пониженных амплитудах скольжения интенсификация износа при фреттинг-коррозии вызывается процессами, отличными по своей природе от схватывания. Такими процессами являются локальное абразивное действие продуктов износа и усталостное разрыхление металла, усугубленное химической активизацией поверхности трения. Очевидно, одним из необходимых условий развития такого специфического поверхностного разрушения является пониженная скорость реверсивного скольжения.

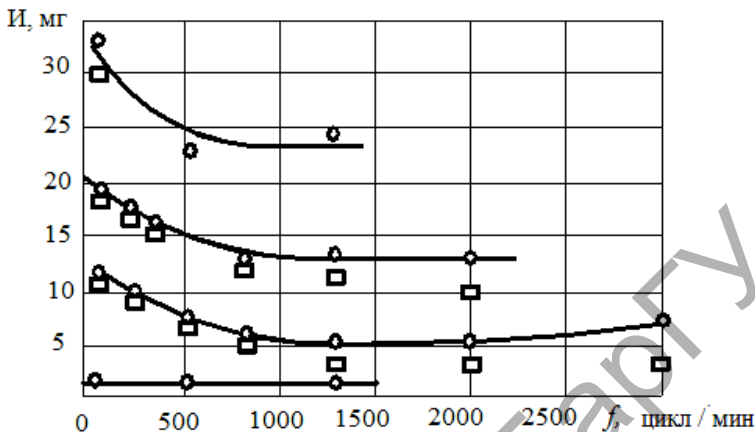
Повышенная склонность к схватыванию (например, бронзы и стали 1Х18Н9Т) может активизировать усталостные процессы в поверхностных слоях, что проявляется в более монотонном характере снижения интенсивности износа при увеличении

амплитуды скольжения (см. рис. 1.9, кривые 1, 2). В свою очередь, с увеличением удельной нагрузки, когда происходит дополнительная активизация процессов схватывания, и при малых амплитудах скольжения величина амплитуды должна меньше влиять на характер изменения интенсивности фреттинг-коррозии, что и наблюдается для стали 1Х18Н9Т. По той же причине при высоких удельных нагрузках для нормализованной стали 45 увеличивается амплитудный диапазон перехода от одной формы разрушения поверхности к другой. Стабильность поведения закалённой стали 45 и бронзы с изменением нагрузки может быть связана с большой твёрдостью и прочностью закалённой стали 45 и с повышенной склонностью бронзы к схватыванию.

Наблюдающееся увеличение коэффициента трения с ростом амплитуды скольжения также свидетельствует о том, что при повышенных амплитудах выход продуктов фреттинг-коррозии из зоны контакта облегчается, увеличивая вероятность контакта исходных металлических поверхностей и их схватывания. Кроме того, не исключено, что с увеличением амплитуды скольжения микровыступы одной поверхности начинают взаимодействовать с большим количеством неровностей сопряжённой с ней поверхности. В результате этого возрастает количество знакопеременных взаимодействий в пятнах фактического контакта, что и проявляется в изменении фрикционных характеристик.

С величиной амплитуды скольжения при фреттинг-коррозии связана скорость относительного перемещения контактирующих поверхностей, которая может существенно влиять на характер и величину износа. Правда, до настоящего времени нет единого мнения о величине амплитуды, которая ограничивает условия возникновения собственно фреттинг-коррозии без наложения эффектов, свойственных обычному однонаправленному скольжению.

Имеются некоторые данные о том, что при низких частотах (1 000 цикл / мин и менее) повреждение, определяемое для данного числа циклов, тем больше, чем ниже частота (рис. 1.10) [15].



1 — проскальзывание 10 мкм, число циклов 67 800; 2 — проскальзывание 90 мкм, число циклов 67 800; 3 — проскальзывание 90 мкм, число циклов 475 800, 4 — проскальзывание 230 мкм, число циклов 67 800; □ — без поправки на температуру; ○ — с пересчётом на 25°C

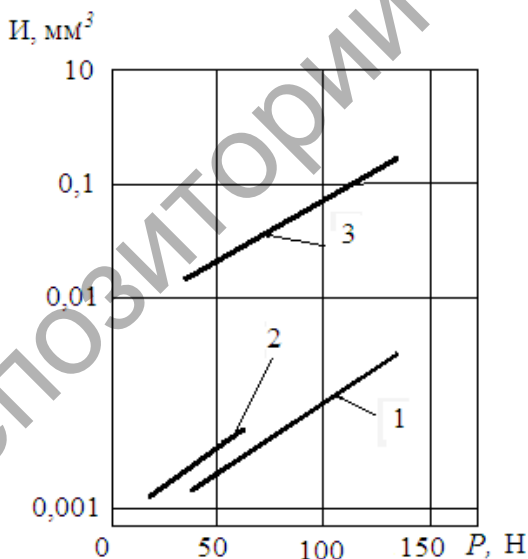
Рисунок 1.10 — Влияние частоты колебаний (f) на повреждение стали при фреттинге с различными амплитудами проскальзывания при давлении 36,5 МПа

Причиной этого является наличие коррозионного фактора при фреттинг-коррозии. Поскольку коррозия, которая включает и окисление, является химическим процессом, она зависит от времени. Следовательно, чем ниже частота, тем дольше длится каждый цикл и тем больше время действия химических факторов. Из этого можно заключить, что не следует ожидать влияния частоты, если фреттинг происходит в пассивной атмосфере. Исследователи I.-M. Feng и H. N. Uhlig показали, что это справедливо для стальных поверхностей, подвергающихся фреттингу в азоте. Кроме того, из их опытов видно, что при частотах выше 1 000 цикл / мин влиянием частоты можно пренебречь. Это же подтвердили учёные F. E. Reed и I. F. Batter [16], которые исследовали влияние частоты в диапазоне от 3 000 до 6 000 цикл / мин. На первый взгляд кажется, что частота оказывает влияние, однако эти результаты приведены для заданного периода фрет-

тинга, а не для заданного числа циклов. Большинство экспериментальных исследований проводилось при частотах выше 1 000 цикл / мин, поэтому при сравнении результатов этим фактором можно пренебречь.

Если амплитуда проскальзывания поддерживается постоянной, то объём повреждений при фреттинге плоских стальных поверхностей возрастает линейно с приложенной нормальной нагрузкой [17].

Авторы работы [18] обнаружили повышение скорости повреждения с увеличением нагрузки в случае фреттинг-износа спечённых алюминиевых порошков. Эти результаты представлены на рисунке 1.11, который включает случаи фреттинга, вибрирующей нормальной нагрузки и комбинации того и другого. Как видно, последнее имеет гораздо большее повреждающее влияние, чем тот или иной из видов отдельно.



1 — вибрация по нормали; 2 — фреттинг;
3 — комбинированная вибрация

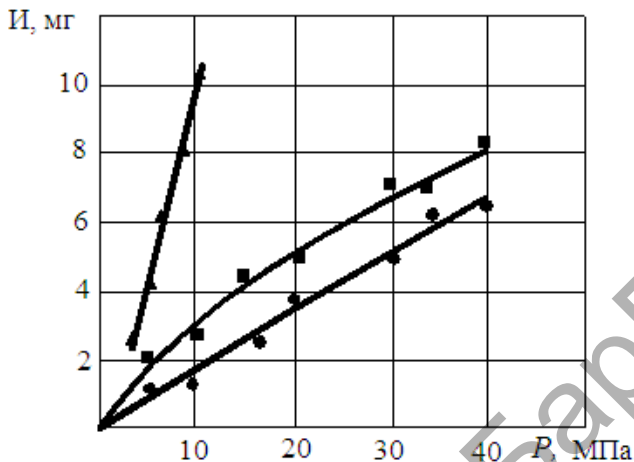
Рисунок 1.11 — Зависимость объёмных потерь за 24 ч от нормальной нагрузки и вибрации

В системах, где увеличение нормальной нагрузки приводит к снижению амплитуды проскальзывания, эти два фактора действуют взаимно противоположно, так что повреждение сначала возрастает, проходит через максимум, а затем снижается [19].

В нашем случае важно рассмотреть влияние на фреттинг-коррозию удельной нагрузки, которая зависит от площади кон такта трибопары «опорная поверхность вала—буксовая втулка (или втулка подшипника)». В процессе изнашивания изменяется площадь фактического контакта сопряжённых поверхностей и глубина поверхностных слоёв металла, принимающих участие в процессах трения и разрушения, следовательно, изменяется и удельная нагрузка.

В работе [20] представлены данные по влиянию удельной нагрузки на износ при фреттинге в виде, позволяющем сравнить их с результатами, которые приводят I.-M. Feng и Н. Н. Uhlig [15], F. E. Reed и I. F. Batter [16] (рис. 1.12). При этом не была произведена корректировка по частоте циклов, которая в последнем случае составляла 6 060 цикл / мин, а в опытах I.-M. Feng'a и Н. Н. Uhlig'a — всего лишь 540 цикл / мин. Очень низкая частота могла дать более высокие результаты повреждаемости за данное число циклов. Следовательно, соответствие между данными К. Н. R. Wright'a и результатами M. Feng'a и Н. Н. Uhlig'a хорошее (см. рис. 1.12).

Задачу выделения ведущего процесса при фреттинг-коррозии в случае его затруднительного определения по внешним признакам можно решить методом от обратного [21]. Для этого необходимо исследовать износостойкость поверхностей, обработанных различными технологическими способами, на испытательных машинах, которые воспроизводят основные ведущие процессы. Высокая эффективность защиты обеспечивается лишь при соответствии метода защиты и ведущего процесса. При этом сама эффективность может оцениваться двумя критериями: отношением количества циклов N к линейному износу образца W , а также значением коэффициента трения. Пользуясь такой методикой [21], можно дать количественную оценку сопротивления поверхности, упрочнённой различными технологическими способами, разрушению фреттинг-коррозией.



1 — данные К. Н. R. Wright ($f = 38$ Гц); 2 — I.-M. Feng и Н. Н. Uhlig ($f = 9$ Гц); 3 — I. F. Batter и F. E. Reed ($f = 101$ Гц)

Рисунок 1.12.— Зависимость износа стали от удельной нагрузки при фреттинг-коррозии ($A = 90$ мкм, $N = 67\,800$ циклов)

В соответствии с тремя периодами протекания фреттинг-коррозии можно выделить три ведущих процесса, сопутствующих данным периодам. Первопричиной развития первого периода фреттинг-коррозии выступают интенсивно протекающие пластические деформации. Для второго периода ведущим процессом является окисление, а для третьего — разрыхление материала с образованием новых свободных поверхностей.

Повреждение контактирующих поверхностей в условиях фреттинг-коррозии определяется в основном рядом ведущих процессов: коррозионно-усталостными процессами, схватыванием и микрорезанием. Хотя эти процессы развиваются в поверхностном слое одновременно, однако (с учётом свойств контактирующих материалов и условий нагружения) один из них становится ведущим, и именно он, в основном, лимитирует ресурс работы контактирующих деталей. Дифференциация ведущих процессов позволяет рационально классифицировать

методы защиты от того или иного ведущего процесса. Все способы защиты поверхностей условно подразделены на четыре основных направления: конструктивно-технологические приёмы, защита от схватывания, защита от усталостно-окислительного разрушения, защита от абразивного разрушения [22].

К первой группе относятся конструктивные и технологические решения, исключаяющие микросмещение поверхностей (увеличение натяга для прессовых посадок, использование демпфирующих устройств для гашения вибраций, улучшение подвода смазочного материала, усовершенствование конструкций и т. д.).

Третья группа методов защиты — упрочнение контактирующих поверхностей механической, термической и химико-термической обработкой. Методы этой группы эффективны, когда в качестве ведущего фактора выступают усталостно-окислительные процессы. К ней относятся методы, уменьшающие коэффициент трения и исключаяющие окислительную среду в зоне контакта (применение смазок, металлических мыл, нанесение плёнок и покрытий и др.).

На основе проведённого анализа составлена классификация методов защиты поверхности от разрушения при фреттинг-коррозии (рис. 1.13), опираясь на которую, учитывая условия работы и характер повреждения поверхностей, определив предварительно ведущий процесс, можно наметить оптимальный метод защиты от фреттинг-коррозии.

Внешними признаками, указывающими на приоритет процессов схватывания при развитии фреттинг-коррозии, являются образование вырыва на одной поверхности и налипание частиц в виде наростов на другой. При дальнейшем перемещении наросты могут, подобно абразиву, диспергировать и деформировать сопряжённую поверхность, а также способствовать образованию и развитию новых узлов схватывания.

Выявить ведущий процесс можно с достаточной степенью точности в результате микроскопического исследования поверхностей трения. При этом следы пластического течения металла, вырывы и налипание частиц металла, следы оплавления и размазывания, надрывы металла, следы окисления и хрупкого



а) — защита от усталостно-окислительного разрушения; б) — защита от абразивного разрушения; в) — защита от схватывания

Рисунок 1.13 — Классификация методов защиты поверхностей при фреттинг-коррозии

разрушения поверхностей и т. д. являются характерными изменениями внешнего вида контактных поверхностей в процессе эксплуатации в условиях фреттинг-коррозии.

В результате анализа условий работы крупногабаритных тяжелонагруженных валов БДМ, характера повреждений их опорных поверхностей, которые лимитируют срок службы данных деталей, было сделано предположение, что ведущую роль при их разрушении играет фреттинг-коррозия.

На основе проведенного анализа литературных данных по исследованию фреттинг-коррозии, влияния различных факторов (механического воздействия, химической активности окружающей среды, природы контактирующих материалов) на интенсивность изнашивания при фреттинг-коррозии, а также методов защиты от неё можно сделать вывод, что для обеспечения долговечности деталей, работающих в условиях фреттинг-коррозии и высоких удельных нагрузок, наиболее рациональным является нанесение на их рабочие поверхности покрытий с требуемыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Учитывая специфику таких деталей, как крупногабаритные тяжелонагруженные валы, нанесение покрытий на их рабочие поверхности производится методами газотермического напыления.

1.3 Материалы, применяемые для получения износостойких покрытий

На требования, предъявляемые к защитным покрытиям, влияют условия работы быстроизнашивающихся деталей машин и механизмов современной техники. Для быстроизнашивающихся деталей основными факторами являются: трение, воздействие абразива, наличие химически агрессивных сред, вызывающих коррозию [23; 24]. Чаще всего детали работают под воздействием комбинации различных факторов. Согласно результатам большого количества работ в области нанесения износостойких покрытий различными методами и из различных материалов, основными физико-механическими свойствами

и эксплуатационными характеристиками, влияющими на их работоспособность, являются: твёрдость и микротвёрдость, прочность сцепления покрытия с материалом основы, уровень остаточных напряжений, пористость покрытий, ударная вязкость и склонность к образованию трещин, характер структуры покрытий. Важным условием является однородность свойств покрытия по глубине [25—42].

Интегральным показателем, определяющим качество покрытия, наносимого по вновь разрабатываемой технологии, является относительная износостойкость, сравниваемая с износостойкостью детали, упрочнённой по базовой технологии. В условиях фреттинг-коррозии износостойкость подразумевает не только минимальную интенсивность изменения линейных размеров или уменьшения массы детали, но и отсутствие схватывания и задиров в процессе работы. Она зависит от условий работы детали, химических и физико-механических свойств покрытия, характера смазки, свойств сопряжённой детали и т. п. [43—45].

Напылённые покрытия, как правило, являются композиционными, т. е. их структура соответствует правилу Шарпи. В этом случае один из компонентов (наименее твёрдый) является матрицей, в которой равномерно распределены включения различных фаз [46; 47]. Износостойкость покрытия определяется твёрдостью как матрицы, так и включений. При работе в условиях трения скольжения оптимальным является сочетание относительно мягкой металлической матрицы, как правило, на основе Ni или Fe, и твёрдых включений, таких, как карбиды, нитриды или бориды, которые, кроме высокой твёрдости, обладают стойкостью против схватывания и достаточной коррозионной стойкостью. Более износостойкими являются покрытия с тонкодисперсной структурой. При их применении ресурс детали увеличивается от 2 до 10 раз. Они широко используются при изготовлении втулок и подпятников подшипников скольжения и других деталей [48—52].

Твёрдость и микротвёрдость покрытий весьма значительно влияют на эксплуатационные характеристики покрытий. Более твёрдые покрытия, как правило, являются более износостойкими.

Кроме того, высокая микротвёрдость всех компонентов покрытия необходима при работе в условиях значительных контактных нагрузок, при которых может произойти продавливание покрытия в случае низкой его твёрдости.

Одной из наиболее существенных характеристик износостойких защитных покрытий, определяющей область их практического применения, является прочность сцепления покрытия с поверхностью основы. Согласно данным [48], при напылении без оплавления наиболее технологичных и широко используемых в промышленности самофлюсующихся порошков на никелевой основе на основу из стали 45 прочность сцепления составляет порядка 20...35 МПа. Такая прочность сцепления не всегда обеспечивает работоспособность деталей, особенно при наличии ударных нагрузок. При предварительном нанесении подслоя из экзотермически терморреагирующих никелево-алюминиевых порошков данный параметр может достигать 55 МПа и более [53].

В результате напыления в покрытии возникают остаточные напряжения растяжения или сжатия, величина которых может достигать 200...300 МПа и превышать прочность сцепления покрытия с основой [54]. Особенно опасны растягивающие напряжения, а сжимающие в ряде случаев могут положительно влиять на эксплуатационные характеристики деталей [55]. Растягивающие напряжения способны привести к трещинообразованию или отслоению покрытий. Одним из факторов, вызывающих остаточные напряжения, является различие коэффициентов линейного расширения материалов основы и покрытия, а также фазовые превращения в процессе нагрева и охлаждения покрытий, сопровождающиеся изменением параметра кристаллической решётки [56—58]. Поэтому необходимо подбирать максимально близкие по свойствам материал основы и покрытия или наносить предварительно на поверхность основы подслои с промежуточными свойствами [59—61]. Кроме того, можно вводить в материал покрытий пластичные добавки с относительно невысокой температурой плавления, например медь [62—64].

Пористость покрытий может как положительно, так и отрицательно влиять на их эксплуатационные характеристики.

При трении скольжения в условиях ограниченной смазки поры играют роль резервуаров смазочного материала, благодаря чему на поверхности трения постоянно присутствует масляная плёнка. Согласно данным [65], в таких условиях пористость величиной до 30% способствует увеличению стойкости напылённых покрытий. Для покрытий на деталях, работающих при воздействии химически агрессивных сред или в паре с мягким материалом, она является нежелательной. Кроме этого, пористость снижает когезию покрытий и сужает диапазон воспринимаемых ими контактных нагрузок.

Применяемый материал наряду с параметрами технологического процесса нанесения является основным фактором, определяющим физико-механические и эксплуатационные свойства покрытий. Причём если на величины таких параметров, как прочность сцепления и пористость, влияние обоих данных факторов примерно одинаково, то для обеспечения требуемой твёрдости покрытий химический состав и морфология выбранного материала имеют первостепенное значение [66—71].

Для обеспечения требуемых свойств покрытий необходимо в комплексе решить ключевые проблемы: во-первых, выбрать материал покрытия и, во-вторых, за счёт подбора технологических параметров добиться формирования требуемых структуры и свойств. При газотермическом напылении основной статьёй расходов являются затраты на приобретение материалов [72; 73]. Поэтому эффективным методом удешевления технологий упрочнения/восстановления является разработка новых материалов, обладающих невысокой стоимостью при высоком уровне физико-механических свойств. Выбор материала для конкретных условий эксплуатации деталей является приоритетным по сравнению с выбором способа и технологических параметров его формирования [74—76].

В настоящее время разработана широкая гамма материалов для формирования износостойких покрытий, которые классифицируются по химическому составу, способу введения легирующих элементов, методу производства, назначению (эксплуатационным характеристикам получаемых покрытий) [75; 77].

В первую очередь материал покрытия должен удовлетворять требуемым эксплуатационным параметрам упрочняемой (восстанавливаемой) поверхности, а также экономическим возможностям, что связано со стоимостью материала, оборудования и оснастки для подготовки поверхности, нанесения покрытия и его последующей обработки [28; 78; 79].

Напыление порошков обладает рядом преимуществ: меньшая энергоёмкость процесса, более качественные покрытия вследствие равномерного распределения легирующих элементов по объёму, состав легко варьировать, создавая композиционные материалы (смеси). Кроме того, темпы развития производства порошков существенно опережают традиционные отрасли металлургического производства: на сегодняшний день гамма порошковых материалов представлена более чем двумя тысячами наименований [80—82].

Широкое распространение получили порошковые материалы на основе никеля, легированные бором, кремнием, хромом и другими элементами [50; 83; 84], так как они обладают уникальными технологическими свойствами — самофлюсуемостью и низкой температурой плавления, а покрытия из этих материалов — высокой износо-, коррозионно- и жаростойкостью, кроме того, имеют высокую прочность сцепления. Эти свойства обеспечиваются образованием легкоплавкой эвтектики, а бор и кремний восстанавливают поверхность металлической основы, снижают температуру плавления сплава, кроме того, свободный бор образует с металлами (Cr, Ni и др.) бориды, повышающие прочность и износостойкость покрытий [85].

Высокие эксплуатационные характеристики покрытий из таких материалов объясняются наличием (с точки зрения износостойкости) структуры, соответствующей правилу Шарпи: дисперсные высокотвёрдые включения карбидов, боридов, силицидов, равномерно распределённых в пластичной никелевой матрице. Микротвёрдость матрицы более 5 000 МПа, а твёрдых включений — 10...24 ГПа. Кроме того, на фазовый состав и свойства покрытия значительное влияние оказывает технология и режимы нанесения покрытий и их последующая термообработка.

Недопустим перегрев выше температуры плавления эвтектики этих сплавов, так как это приводит к укрупнению всех фаз и снижению твердости [28; 65; 86—88].

Наиболее распространёнными самофлюсующимися материалами являются сплавы системы Ni-Cr-B-Si, но существуют сходные по цене и свойствам порошки на основе кобальта, а также плакированные и конгломерированные порошки [77; 80].

Основными производителями порошков для газотермического напыления и наплавки на территории СНГ хромоникелевых и кобальтовых порошков являются ОАО «Полема» (Россия) и ОАО «Торезтвёрдосплав» (Украина) [74; 89—92].

Несмотря на высокие технологические свойства упомянутых выше порошков и высокое качество покрытий, их широкое применение сдерживается значительной себестоимостью. Это вызвано применением в качестве основы дорогостоящих материалов: никеля, хрома, кобальта, недостатками которых также являются значительное различие коэффициентов линейного расширения с железосодержащими материалами, в силу чего такие покрытия склонны к трещинообразованию вследствие большой усадки [80; 93; 94].

С точки зрения стоимости альтернативой упомянутым выше материалам являются порошки на основе железа, стоимость которых в 2...5 раз ниже. Однако при газотермическом напылении таких материалов проблемой является их низкая пластичность, высокая склонность железа к выгоранию и повышенная температура плавления [89; 95]. Данные материалы применяются в основном для восстановления геометрических параметров деталей, так как они значительно повышают физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики.

Недостатки порошков на основе железа можно частично компенсировать, добавляя к ним самофлюсующиеся материалы на никелевой основе. Одним из вариантов получения таких композиционных материалов является добавление в никелевый самофлюс чистого железного порошка (до 40%), в этом случае свойства никелевого порошка будут определять эксплуатационные характеристики покрытия [89]. Такие материалы можно применять для газопламенного и плазменного напыления без оплавления покрытий [65].

Композиционный материал также можно получить добавлением к никелевым материалам высоколегированных железных порошков, что позволяет повысить физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики покрытий при высокой технологичности напыления таких порошков [89; 93]. Однако уровень получаемых свойств ограничен из-за недостаточной способности таких порошков к самофлюсованию.

В настоящее время разработана широкая гамма самофлюсующихся материалов на основе железа, легированных бором и кремнием [73; 90; 92]. К ним относится порошок марки ПР-Х4Г2Р4С2 (ОАО «Полема»), который обладает хорошей способностью к самофлюсованию и обеспечивает высокую твёрдость покрытия [80; 96]. Формирование структуры аналогично материалу на никелевой основе. Преимуществом таких порошков является высокая твёрдость металлической матрицы (до 8 000 МПа) и, соответственно, высокая износостойкость покрытия. Недостатки такие же, как и у других железосодержащих материалов.

Основными способами получения покрытий на основе железа являются наплавка и припекание [89; 93; 97], а также напыление с переплавом [41; 96; 98]. Высокая температура плавления ограничивает их применение для газотермического напыления, так как не обеспечивается необходимая прочность сцепления. Для таких покрытий характерен высокий градиент температур при остывании, что связано с перенасыщенностью твёрдых растворов α - и γ -фаз, увеличением параметра кристаллической решётки и формированием твёрдого и хрупкого мартенсита, в результате такие покрытия склонны к трещинообразованию [56; 99]. В целях уменьшения этого недостатка необходимо повышать содержание остаточного аустенита в покрытии [56; 100].

Модифицирование порошковых смесей на основе железа различными легирующими добавками, а также применение высокоэнергетических процессов (плазменное напыление, высокоскоростное газопламенное напыление) позволяют наносить покрытия из таких материалов без последующего оплавления. Например, плазменное напыление композиционного покрытия ПР-Х4Г2Р4С2-медь (30...40%) обладает высо-

кими физико-механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками ($\sigma_{\text{ст}} = 100$ МПа, износостойкость аналогична ПГ-СР4 на никелевой основе) [62; 63; 101]. Данный уровень свойств достигается после высокотемпературного отжига покрытий в течение одного часа. Однако уникальное дорогостоящее импортное оборудование, основанное на использовании высокоэнергетической аргоно-водородной плазмы, сдерживает распространение этой технологии.

1.4 Анализ технологий повышения износостойкости

В настоящее время в связи с тем, что всё больше машин и механизмов работает в тяжёлых эксплуатационных условиях (при постоянно возрастающих скоростях и нагрузках в сопряжениях), серьёзно ужесточаются требования к качеству продукции машиностроительной отрасли, в частности, свойствам рабочих поверхностей деталей. При этом сложившаяся экономическая ситуация и усиление конкуренции диктует необходимость снижения производственных затрат [102; 103]. Расширение применения легированных сталей с высокими физико-механическими свойствами, которые для Республики Беларусь являются статьёй импорта, весьма затруднено из-за их значительной стоимости. Кроме задач обеспечения высокого качества изготавливаемых деталей машин, остро стоит проблема восстановления и ремонта изношенных деталей, что позволит обеспечить экономию сырья и материалов.

Решить обе эти проблемы можно с помощью нанесения защитных покрытий. В промышленности наиболее широкое применение нашли методы газотермического напыления благодаря универсальности, гибкости процессов, возможности их применения в различных производственных условиях для упрочнения широкой номенклатуры деталей [104—108].

Напыление заключается в образовании на поверхности изделия покрытия из нагретых до температуры плавления или

близкой к ней частиц распыляемого материала с использованием теплоты сжигания горючей смеси или дугового разряда в газовых средах [48; 77; 105; 109—111]. Применяется для повышения износостойкости, коррозионной стойкости, жаропрочности или восстановления изношенных деталей. В качестве напыляемого материала используют металлы, сплавы, неметаллические материалы, композиционные смеси.

Источниками теплоты при напылении служат, как правило, газовое пламя, плазменная или электрическая дуга. Газопламенный метод имеет следующие преимущества: возможность напыления мелких деталей сложной формы, снижение опасности возникновения трещин, простота и невысокая стоимость оборудования. Вместе с тем существует ряд недостатков — расход дефицитных газов, нехватка высококвалифицированного персонала, затруднённый предварительный подогрев массивных крупногабаритных деталей, невозможность нанесения тугоплавких материалов, интенсивные окислительные процессы [37; 49]. В общем объёме работ газопламенная технология занимает 20%, а плазменная и электродуговая — 80.

Электротермические процессы напыления используют благодаря их преимуществам: возможностью нанесения металлического покрытия с толщиной до нескольких десятков миллиметров, высокой производительностью, отсутствием ограничений номенклатуры наносимых материалов и размеров наплавляемых поверхностей деталей, возможностью нанесения износостойких покрытий на металл любого состава [48; 112; 113].

Электродуговая металлизация ограничивает номенклатуру распыляемых материалов только электропроводящими. Кроме того, качество напыляемых покрытий довольно низкое из-за интенсивного окисления напыляемого материала кислородом воздуха. Метод используется для нанесения покрытий из алюминия, цинка, сталей, сплавов на основе железа и никеля.

При газопламенном напылении сравнительно невысокая температура пламени (до 3 500 К) ограничивает круг распыляемых материалов. С помощью данного метода могут наноситься покрытия из относительно легкоплавких материалов (цинк,

медь, алюминий, сплавы на основе никеля и железа, полимерные материалы). Однако низкая стоимость применяемого оборудования обеспечивает этому методу широкое применение.

В последние годы применяется метод высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF), при котором скорость газопламенной струи в 4...5 раз (560...1 090 м/с) выше по сравнению с традиционным методом, что позволяет повысить качество получаемых покрытий и производительность напыления [109; 110; 114; 115]. Данный метод весьма перспективен, однако пока не получил широкого распространения из-за сложности и дороговизны применяемого оборудования.

Для детонационного напыления при относительно невысокой температуре (около 3 500К) характерны весьма значительные скорости распространения волны (2 000...4 000 м/с). В силу этого скорость частиц порошка достигает 500...1 000 м/с. За счёт высокой кинетической энергии обеспечивается повышенная прочность сцепления и высокая плотность покрытия [116; 117]. Метод применяется главным образом для нанесения покрытий на основе карбидов тугоплавких материалов, а также некоторых других материалов (оксиды алюминия, хрома, карбид хрома) [116]. Его недостатки — высокая стоимость оборудования и значительный уровень шума при напылении (до 140 дБ), требующий размещения установок в специальных помещениях.

Плазменное напыление — наиболее высокоэнергетический из газотермических методов. В зависимости от применяемого плазмообразующего газа температура плазменной струи может составлять 10 000...25 000°С [118; 119].

По сравнению с приведёнными выше методами напыления процесс плазменного напыления имеет следующие достоинства:

- универсальность, обеспечивающая возможность нанесения покрытия из металлов, сплавов, оксидов, карбидов, нитридов и различных их комбинаций; разнообразие материалов основы, на которую могут быть нанесены покрытия (металл, керамика и т. д.);
- простота управления процессом получения покрытия (энергетические характеристики плазмы можно изменять в зависимости от требований технологии в процессе напыления);

– отсутствие либо незначительное содержание кислорода в плазменной струе, что уменьшает окисление напыляемого материала и основы;

– повышенная температура плазменной струи по сравнению с факелом при газопламенном напылении;

– более высокая прочность сцепления и пониженная пористость плазменных покрытий по сравнению с газопламенным или электродуговым методом [48; 104; 110; 111; 120; 121].

К недостаткам плазменного напыления можно отнести высокий уровень шума (60...120 дБ), возможность перегрева напыляемого изделия, что является причиной возникновения высоких остаточных напряжений, которые могут привести к короблению детали и способствуют развитию усталостных процессов разрушения.

Кроме плазменного напыления в открытой атмосфере существуют методы плазменного напыления в защитной среде. К ним относятся 1) плазменное напыление с локальной защитой, 2) напыление при пониженном давлении или в вакууме (LPPS, VPS) и 3) подводное плазменное напыление (UPS) [110]. Плазменное напыление с локальной защитой заключается в том, что к плазматрону присоединяется специальная насадка, в которую подаётся инертный защитный газ для защиты напыляемого материала от окисления [110].

Плазменное напыление в вакууме производится в камерах низкого давления (7...13 кПа). При этом достигается высокая скорость плазмы и увеличивается длина плазменного факела (130...170 мм) по сравнению с напылением на воздухе (40...50 мм). Таким образом, перепад температуры по оси струи происходит плавно, исключая окисление напыляемого материала. Кроме того, имеется возможность очистки поверхности дугой обратной полярности, которая также может использоваться в качестве дополнительного источника энергии при напылении тугоплавких материалов [104; 110; 122—124].

Подводное напыление является одним из новейших вариантов плазменного напыления. Установлено, что этим методом можно получить плотные слои с хорошим (до 300 МПа) сцеплением

в случае напыления порошками самофлюсующихся материалов [110; 125]. Сущность метода заключается в создании двухфазной высокотемпературной струи под слоем жидкости (воды) с последующим осаждением частиц порошка на поверхность изделия. Преимущества метода: отсутствие окисления порошка, возможность «мокрой» абразивно-струйной обработки непосредственно перед напылением, высокая экологическая чистота процесса, существенное снижение уровня шума. Недостатки: высокая стоимость оборудования, жёсткие требования к гранулометрическому составу напыляемых порошковых материалов.

Специальные методы плазменного напыления применяются для получения покрытий на ответственных деталях машин и оборудования в авиационно-космической, химической и атомной промышленности.

Упрочняющая обработка напылённых покрытий направлена в первую очередь на увеличение плотности покрытий и повышение прочности их сцепления с основой, а также модифицирование их химического состава.

На современном этапе развития технологии нанесения покрытий разработаны методы их последующей обработки: пропитка, термомеханическая обработка, оплавление, химико-термическая обработка, термодиффузионный отжиг.

Пропитка заключается в насыщении напылённого покрытия пластичным металлом, полимерами с помощью электролитического осаждения или погружением в расплав. При этом заполняются поры покрытия и повышается его плотность. Применяется для уменьшения пористости покрытий и придания им антифрикционных свойств. Недостатки метода — высокие энергоёмкость и стоимость оборудования [126].

Термомеханическая обработка проводится в целях уплотнения покрытия, уменьшения припуска на последующую механическую обработку. Результаты исследований по механической обработке покрытий роликом в горячем состоянии описаны в [109]. При температуре 1 000°C и усилии обкатывания 1 500 Н трещины и поры в покрытии из самофлюсующегося никелевого сплава полностью отсутствовали.

Оплавление применяется в основном для самофлюсующихся сплавов и в силу широкого использования данных материалов для нанесения защитных покрытий является наиболее распространённой технологией последующей термообработки. Оно обеспечивает устранение оксидных плёнок на границе раздела «покрытие — основа», между слоями покрытия и между отдельными частицами [127] и может производиться с помощью широкого набора технических средств: газопламенных горелок, печного нагрева, установок токов высокой частоты, лазерного луча [48; 49; 128—131]. Температура оплавления лежит между линиями «ликвидус» и «солидус» оплаваемого сплава. Наиболее эффективно и с минимальными энергетическими затратами оплавляются сплавы эвтектического состава, имеющие низкую температуру плавления [131; 132]. При оплавлении происходит химическая реакция между кислородом оксидных плёнок и содержащимися в покрытии флюсующими элементами — кремнием и бором. При этом образуются шлаки, которые всплывают на поверхность, очищается поверхность контакта как между частицами, так и между металлами покрытия и основы. За счёт этого в несколько раз возрастает прочность сцепления покрытий, устраняется или резко уменьшается пористость. Кроме этого, в материалах, содержащих бор и углерод, образуется значительное количество боридной и карбидной фазы, формируется дисперсная структура правила Шарпи и повышается твёрдость покрытий [49]. Недостатками оплавления являются применимость для узкой номенклатуры материалов покрытий, неравномерность нагрева и возможность коробления заготовки, возникновение высоких остаточных напряжений, снижающих усталостную прочность детали, сложность контроля процесса, который часто проводится визуально. Оплата покрытия позволяет повысить прочность сцепления с основой до 100...300 МПа.

Для улучшения свойств покрытий из материалов, не обладающих свойствами самофлюсуемости, применяются различные методы термической и химико-термической обработки.

Известен способ обработки газотермических покрытий из самофлюсующихся сплавов [133; 134] оплавлением в расплаве солей при температурах, не более чем на 15...20°C превышающих

температуру плавления, нагрев под оплавление проводят с выдержкой в области фазовых превращений материала основы, соответствующих 20...30 и 50...80% перехода одной фазы в другую.

В [48] описан способ напыления с последующим диффузионным насыщением покрытия на заготовке порошком марки ПЖРВ на основе железа с добавками оксида хрома и последующей химико-термической обработкой покрытия. Покрытие наносили газопламенным напылением, после чего помещали в печь с контролируемой атмосферой, содержащей водород и углерод, и выдерживали там при заданной температуре. В результате достигли полного восстановления окисленного напылённого слоя из порошка ПЖРВ, слоистость и пористость в покрытии исчезла. При добавлении в напыляемый материал оксида хрома необходимая продолжительность режима восстановления увеличивается в 1,5...2 раза. Однако наличие карбидообразующего элемента способствует возрастанию карбидной фазы и повышению твёрдости слоя. Не наблюдалось заметного различия значений микротвёрдости напылённого покрытия и основного материала, что говорит о равномерности структуры и высокой прочности сцепления с основой.

Термодиффузионный отжиг заключается в выдержке покрытия при определённой температуре в вакууме или в атмосфере некоторое время. Под воздействием температуры с течением времени происходит диффузия элементов покрытия в материал основы с образованием новых фаз. Данный метод подробно описан в [110; 111; 135—137]. В покрытиях железного порошка с добавкой меди диффузионное взаимодействие проходит две стадии: зерно — граничная, а затем объёмная диффузия легирующих элементов и меди. В результате прочность сцепления увеличивается более чем в 4 раза [136; 137].

Выводы

Анализ условий работы валов БДМ, обзор и анализ литературных данных позволили сделать следующие выводы:

1. Валы бумагоделательного оборудования работают в условиях высоких нагрузок и вибраций, передаваемых, в частности, от подшипников качения. Лимитирующими факторами срока службы валов являются опорные поверхности,

т. е. сопряжения «шейка вала — втулка подшипника». Данная трибопара, являясь номинально неподвижным соединением, под воздействием высоких удельных нагрузок и вибраций подвергается фреттинг-коррозии, которая приводит к возникновению схватывания и абразивного изнашивания опорной поверхности.

2. Процесс изнашивания контактирующих поверхностей при фреттинг-коррозии в значительной степени определяется механическими и термодинамическими свойствами поверхностных слоёв взаимодействующих тел.

3. При фреттинг-коррозии усталостные процессы могут иметь первостепенное значение, однако их роль в процессе разрушения контактирующих поверхностей недостаточно ясна.

4. Так как при фреттинг-коррозии можно ожидать предельного разрушения кристаллической решётки металла, то развитая в дефектном отношении структура материала может значительно интенсифицировать протекание механо-химических (трибохимических) процессов (например, образование при фреттинг-коррозии сталей α -Fe₂O₃).

5. Изнашивание при фреттинг-коррозии зависит от внешнего механического воздействия, химической активности окружающей среды, природы контактирующих материалов, свойств продуктов износа и т. д. Параметрами внешнего механического воздействия являются продолжительность нагружения, удельная нагрузка, амплитуда скольжения и частота колебания. Они, в основном, определяют характер и интенсивность разрушения контактирующих металлических поверхностей при фреттинг-коррозии.

6. Интенсивность изнашивания при фреттинг-коррозии в значительной степени определяется прочностными характеристиками материала (твёрдостью, микротвёрдостью, усталостной прочностью) и его склонностью к окислению.

7. Существует зависимость между демпфирующей способностью металлов и склонностью к фреттинг-коррозии. Однако однозначной связи между свойствами рассеяния энергии колебаний и износостойкостью при фреттинг-коррозии в настоящее время не установлено. Это объясняется тем, что интенсивность разрушения при фреттинг-коррозии определяется комплексом физико-химических свойств материала.

8. Одним из перспективных методов защиты поверхности от изнашивания и коррозионных процессов при фреттинг-коррозии и повышения долговечности деталей машин является нанесение покрытий с требуемыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами газотермическими методами — газопламенным, плазменным с применением последующего оплавления напылённых покрытий. Для крупногабаритных тяжело нагруженных деталей, какими являются валы БДМ, применение последующего оплавления затруднено вследствие их габаритных размеров, достигающих 10 000 мм и массы — до 170 т, а также возможности возникновения остаточных напряжений, снижающих усталостную прочность, что недопустимо для тяжело нагруженных деталей. Решение проблемы упрочнения крупногабаритных тяжело нагруженных валов заключается в разработке технологии получения износостойких покрытий с прочностью сцепления не менее 50...60 МПа, при условии соблюдения интервала температур нагрева основы (150...200°C), не приводящего к её перегреву и развитию процессов усталостного разрушения.

Поэтому для повышения прочности сцепления предполагается наносить промежуточный слой (подслой) плазменным напылением из терморегулирующего материала NiAl с практически одновременным напылением основной части газотермического покрытия (далее — ГТП) из разрабатываемых композиций газоплазменным методом. Это позволит, во-первых, получить промежуточный слой с высокой прочностью сцепления за счёт высокой скорости и высокой температуры частиц при плазменном напылении и свойств терморегулирующего материала (экзотермической реакции), что способствует увеличению времени протекания химической реакции; во-вторых, получить высокую прочность сцепления основного покрытия с подслоем и основой за счёт сокращения времени между операциями напыления (отпадает необходимость перенастройки плазменной установки на напыление основной части ГТП); это снизит количество образовавшихся окисных плёнок на поверхности и даст возможность напылять основную часть ГТП на подогретую основу после плазменного напыления. Кроме того, применение газоплазменного метода не приведёт к катастрофическому перегреву основы и сведёт к минимуму вероятность развития усталостных процессов разрушения.

9. Несмотря на интенсивное развитие технологий газотермического напыления покрытий, по-прежнему остаётся актуальной задача снижения себестоимости данных процессов при увеличении качества покрытий. Основным направлением удешевления напыления является разработка новых композиций и материалов, заменяющих дорогостоящие без потери качества. В настоящее время для нанесения покрытий широко применяются самофлюсующиеся порошки на основе никеля, недостатком которых является высокая стоимость. Порошки на железной основе обладают стоимостью в 2...4 раза меньшей, но вследствие более высокой температуры плавления, низкой пластичности и высокой окисляемости их технологичность ниже. Такие порошки целесообразно применять либо при введении в них большого количества легирующих элементов, пластификаторов, либо как основу для механических смесей.

10. Создание композиции из самофлюсующихся материалов на основе железа, терморегулирующих и медьсодержащих порошковых материалов позволит получить покрытия с необходимыми физико-механическими, эксплуатационными свойствами при невысокой стоимости относительно материалов на никелевой основе.

РАЗДЕЛ 2 ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ В ПРОЦЕССЕ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Оборудование и материалы, применяемые в исследованиях

Технологический процесс нанесения газотермического покрытия на металлическую поверхность включает следующие стадии: подготовку поверхности перед нанесением покрытия в целях повышения энергии активации основы, напыление покрытия, последующую термическую и (или) механическую обработку.

Подготовка поверхности перед напылением производилась дробеструйной и лезвийной обработкой.

Дробеструйная обработка является эффективным и производительным методом, обеспечивающим как очистку поверхности от адсорбированных масляных и оксидных плёнок, так и активацию основы вследствие интенсивного перенаклёпа [59]. Применялись следующие режимы дробеструйной обработки: давление воздуха 0,5 МПа при диаметре сопла 8 мм, дистанция — 30 мм [65]. Использовалась чугунная колотая дробь ДЧК-1,5 со средним размером 1,5 мм в соответствии с ГОСТ 11964-81 Дробь чугунная и стальная техническая. Общие технические условия.

При подготовке заготовок (в виде формы тел вращения) самым распространённым способом является нарезание резьбы, которое обеспечивает повышенную прочность сцепления при сдвиге покрытия. Для этого использовали резьбовой резец с углом при вершине 55...60°. Вершина угла с радиусом закругления 0,3...0,5 мм, угол резания — 80°, передний угол резца равен 0° или отрицателен (–2...–5°). Резец устанавливали в резцедержателе с вылетом 100...150 мм. Для получения необходимой шероховатости режущую кромку смещали ниже оси заготовки. Вибрация резца вызывает дробление металла на обрабатываемой поверхности, что приводит к деформации. Рекомендуются следующие зна-

чения шага резьбы: при диаметре заготовки до 20 мм — 0,5 мм; 25...50 мм — 0,8...1,0 мм; 60...100 мм — 1,5 мм; глубина резания — 0,4...0,7 мм [99]. Нельзя применять охлаждающие жидкости.

В рамках проведённых исследований напыление покрытий производилось в определённой последовательности — плазменное напыление подслоя из терморезирующего материала и газопламенное напыление основной части ГТП из разработанных композиций.

Для плазменного напыления использовалась установка УПУ-3Д с плазмотроном ПП-25. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газа применялся аргон (ГОСТ 10157-79 Аргон газообразный и жидкий. Технические условия), расход газа — $3 \text{ м}^3/\text{ч}$. Напряжение дуги — 80...85 В, сила тока варьировалась в пределах 240...260 А, дистанция напыления — 160...180 мм.

Газопламенное напыление производилось на установке ТРУ-БПИ. В качестве горючего газа применялась метилацетиленовая фракция (далее — МАФ) в соответствии ТУ-38.102.12-89, транспортирующего — воздух. Расход МАФ составлял $1,0...1,2 \text{ м}^3/\text{ч}$, кислорода (ГОСТ 5583-79 Кислород газообразный технический и медицинский. Технические условия) — $4,0...4,5 \text{ м}^3/\text{ч}$, воздуха — $0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$, дистанция напыления 180...220 мм.

Механическая обработка покрытий осуществлялась шлифованием кругами из карбида кремния на керамической связке класса твёрдости «С» при глубине резания 0,003...0,030 мм, а также точением торцевых поверхностей резцами со вставками из твёрдого сплава ВК6 и эльбора.

Исходя из поставленной цели исследований разрабатывались композиции на основе износостойких, антифрикционных и терморезирующих материалов. Выбор исходных порошковых материалов для создания композиций в целях последующего получения газотермических покрытий производился по соответствию их следующим условиям:

- высокий уровень физико-механических свойств покрытий, обеспечивающих защиту от различных видов износа (абразивного, фреттинг-коррозии) и прочность сцепления, гарантирующую работоспособность деталей с покрытиями;
- минимальная себестоимость композиций.

Первому условию соответствуют медьсодержащие композиции, а также материалы на основе никеля, железа (бронзы, баббиты). Повышенный уровень свойств в покрытии прогнозируется в случаях наличия в исходном материале значительного количества легирующих элементов, способствующих повышению износостойкости, стойкости к фреттинг-коррозии, антифрикционных свойств и прочности сцепления. Это характерно для самофлюсующихся материалов на основе никеля и железа, бронзы. Термореагирующие материалы за счёт экзотермической реакции повышают температуру в зоне контакта напыляемого материала и основы, что способствует их проплавлению и повышению температуры в контакте «покрытие—основа», увеличивая тем самым прочность сцепления.

Второму условию удовлетворяют самофлюсующиеся сплавы на основе железа и материалы на основе меди. Кроме того, сопротивлением изнашиванию при фреттинг-коррозии обладают композиции на основе никеля, железа, алюминия, меди и материалы, содержащие карбиды хрома, титана, ванадия [138]. Известна композиция ПС-85Н70Х17С4Р4 + 15Ю10Н, стойкая к износу и фреттинг-коррозии [139].

На технологичность порошковых материалов и на свойства покрытий влияет форма исходных частиц, а также особенности её структуры и фазового состава. С точки зрения технологичности важным положительным фактором является сферичность частиц порошка. Максимально приближённая к сфере форма частиц обеспечивает их хорошую текучесть, равномерность расхода и прогрева и, как следствие, высокую производительность напыления, а также способствует получению покрытий с меньшей пористостью и более высокой прочностью сцепления.

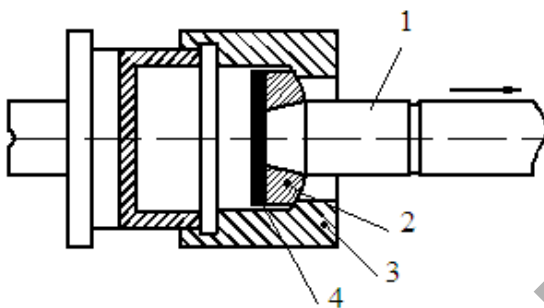
В проводимых исследованиях, учитывая вышесказанное, целесообразным было изучить эффективность газотермического напыления композиционных покрытий на основе следующих материалов: самофлюсующихся материалов на основе железа, термореагирующих (NiAl) и медьсодержащих. Для составления композиций и проведения исследований были выбраны следующие компоненты: ПР-НД42СР (ТУ 14-127-309-01); ПГ-19М-01 (ТУ 48-4206-156-82); ПТ-НА-01 (ТУУ-322-19-004-96); ПР-Х4Г2Р4С2Ф (ТУ 14-22-18-88).

Физико-механические и эксплуатационные свойства покрытий из исследуемых композиций сравнивались с соответствующими показателями для напылённых покрытий из самофлюсующегося сплава ПГ-СР4 и стали 45. Выбор данных материалов для сравнения обусловлен тем, что первый наиболее распространён среди защитных износостойких материалов, а сталь 45 является основным материалом, применяемым для изготовления цапф валов бумагоделательного оборудования.

2.2 Методики определения прочности сцепления и оценки остаточных напряжений

Прочность сцепления покрытия с основным металлом характеризуется усилием отрыва покрытия от основы, отнесённым к проекции площади отрыва на плоскость, перпендикулярную действующей силе.

Наиболее распространённым методом определения прочности сцепления является метод штифтовой пробы, основанный на непосредственном определении силы, направленной перпендикулярно к напылённой поверхности и отрывающей покрытие от основного металла [48; 104]. Схема испытаний представлена на рисунке 2.1. Сочленение штифта 1 и кольца 2 выполнено по переходной посадке H8/n8, что позволяет исключить трение между ними. Перед дробеструйной обработкой и напылением торцовые поверхности обрабатывались так, чтобы кольцо выступало относительно штифта на 0,05...0,15 мм, а после дробеструйной обработки кольцо и штифт притирались. Это позволило исключить нарушения посадки при деформировании поверхностных объёмов металла в процессе дробеструйной обработки. Для закрепления образца в разрывной машине использовались специальные оправки, которые соединялись с захватами разрывной машины при помощи гибких тросов. Это обеспечило строгую перпендикулярность усилия отрыва торцовой поверхности образца.



1 — конический штифт; 2 — шарнирное кольцо; 3 — шарнирная опора; 4 — напылённый слой

Рисунок 2.1 — Принципиальная схема испытания покрытия на отрыв [6]

В эксперименте использовалась разрывная машина RIENLE с плавно изменяющимся усилием 0...50 000 Н. Применялась минимальная скорость нагружения, обеспечивающая статический характер нагрузки. Усилие, соответствующее моменту отрыва покрытия от штифта, отмечалось по шкале, проградуированной в килограммах, и затем переводилось в ньютоны. Значение прочности сцепления $\sigma_{\text{сц}}$ определялось по формуле

$$\sigma_{\text{сц}} = P/F,$$

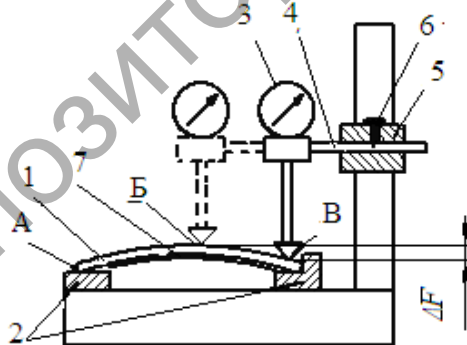
где P — усилие;

F — площадь торцевой поверхности штифта, найденная из выражения $F = \pi d^2/4$, где d — диаметр штифта, равный 12 мм.

Для обеспечения сопоставимости получаемых значений $\sigma_{\text{сц}}$ для разных образцов толщина напыляемых покрытий выдерживалась постоянной и составляла 0,9 мм. Кроме этого, сохранялся постоянным интервал времени между подготовкой поверхности и напылением. Для обеспечения статистической достоверности полученных результатов при проведении испытаний использовалось по пять образцов с покрытиями, нанесёнными на одинаковых режимах. Для определения оценок и доверительных интервалов

получаемых результатов использовались формулы ГОСТ 11.004-74 Прикладная статистика. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров нормального распределения.

Оценка уровня остаточных напряжений в слое покрытия производилась по величине прогиба призматических образцов малой толщины (3 мм) [140]. На гладкие пластины размером $100 \times 10 \times 3$, отшлифованные с двух сторон для обеспечения плоскостности, после операции подготовки поверхности напылялось покрытие толщиной до 2 мм. Чтобы предотвратить нарушение микрогеометрии поверхности и обеспечить связанную с ней точность замеров прогибов образцов, базовые поверхности длиной 10 мм не подвергались напылению. Общий вид приспособления для замера величины прогиба показан на рисунке 2.2. Образец 1 устанавливается базовыми необработанными поверхностями на установочные столики 2. Измерение прогиба производилось фиксированием показания индикаторной головки 3 в крайних точках А и В и в центре образца Б путём перемещения планки 4 в направляющей втулке 5 и фиксации её в данных положениях стопорным винтом 6. Цена деления индикаторной головки 0,01 мм.



1 — образец; 2 — установочные столики; 3 — индикаторная головка; 4 — подвижная планка; 5 — направляющая втулка; 6 — винт; 7 — покрытие

Рисунок 2.2 — Приспособление для измерения величины прогиба образцов

Величина прогиба Δf определялась по формуле

$$\Delta f = \left| \frac{N_A - N_B}{2} - N_B \right|,$$

где N_A , N_B , N_B — показания индикатора в точках А, Б, В соответственно. Таким образом снижалось влияние возможной непараллельности хода направляющей планки 4 установочным столикам 2.

Если образец выгибался (как показано на рисунке 2.2), что соответствует сжатию покрытия, то прогиб принимался со знаком «минус». Прогиб соответствует напряжениям растяжения и принимается со знаком «плюс». Численная оценка остаточных напряжений σ производилась по формуле

$$\sigma = \frac{4EH\Delta f}{L^2},$$

где E — приведённый модуль упругости образца с покрытием,

рассчитываемый по формуле $E = \frac{E_D I_D + E_P I_P}{I_\Sigma}$, где E_D

и E_P — модуль упругости материала (для стали равный $2,1 \cdot 10^5$ МПа) основы и материала покрытия соответственно (для композиционного покрытия модуль упругости определяли как сумму модулей для каждого компонента в соответствующих долях) [141]; I_D , I_P , I_Σ — момент инерции детали без покрытия, собственно покрытия и суммарный соответственно, МПа .

H — высота образца с покрытием, мм;

L — длина образца, мм.

2.3 Методики изучения структуры, определения микротвёрдости, пористости и оценки трещинообразования покрытий

Для изучения структуры, микротвёрдости, пористости газотермических покрытий использовались шлифы поперечного среза. Место вырезки шлифа выбирали так, чтобы образец был достаточно типичен для композиции «основной металл—покрытие».

Далее образцы подвергались шлифованию бумажными или тканевыми наждачными шкурками ступенчато, с переходом от крупной зернистости (60/40) к мелкой (1/0). После каждой ступени шлифования проверяли качество поверхности. Не должно оставаться следов шлифования от предыдущего шлифования (т. е. перпендикулярных рисок). Время шлифования одной шкуркой составляло 5...10 мин.

Риски, оставшиеся от шлифования последней шлифшкуркой, устранялись полированием, для чего использовали вращающийся металлический диск с натянутой или приклеенной тканью. Паста с дисперсным абразивом подавалась в зону контакта поверхности образца и ткани. Хорошее качество шлифа достигалось при использовании мелкозернистой пасты ГОИ, в состав которой входят оксид хрома, стеарин, керосин, олеиновая кислота и сода.

Окончательная обработка шлифов после полирования включает операции промывки в проточной воде, сушки, обезжиривания этиловым спиртом или эфиром и заключительной сушки в струе тёплого воздуха или с помощью фильтровальной бумаги.

Перед исследованиями шлифы были подвергнуты травлению с помощью специального раствора: 4 г пикриновой кислоты; 0,5 мл HNO_3 ; 95,5 мл спирта технического. Это позволило выявить структуру металлической матрицы покрытий.

С помощью оптического микроскопа MeF3 Rotoscope были сделаны снимки образцов до и после травления.

Испытание микротвёрдости производилось при помощи микротвердомера ПМТ-3 и Micromet II (рис. 2.3) по стандартной методике (ГОСТ 9450-76 Измерение микротвёрдости вдавливанием алмазных наконечников) при величине статической нагрузки $P 0,981 \text{ Н}$ (100 г).



Рисунок 2.3 — Микротвердомер
Micromet II

Если при испытаниях хрупких покрытий на поверхности отпечатка или на прилегающих к нему участках обнаруживались сколы и трещины, то результаты не учитывались.

Значение микротвёрдости H_{μ} , ГПа, определялось по формуле

$$H_{\mu} = \frac{1854P}{(kd)^2} \cdot 10^4,$$

где P — нагрузка, г;

d — диагональ отпечатка, количество делений;

k — индивидуальный коэффициент прибора, равный 0,3.

Количественный стереологический анализ образцов проводился с помощью программного комплекса обработки и анализа изображений Autoscan, разработанного научно-исследовательским институтом прикладных и физических проблем им. А. Н. Севченко (г. Минск).

Из десяти возможных геометрических параметров структуры выбирали в качестве основной характеристики пористость (процент интересующей фазы — отношение общей детектируемой площади к площади поля).

Обработка результатов анализа изображения проводилась по программе, которая даёт возможность статистического анализа результатов по любому из заданных измерений и построения гистограмм по любому из измеренных параметров с желаемым шагом.

Определение пористости и размера пор включает в себя следующие этапы: калибровка изображения, фиксация изображения, сегментирование, выбор необходимых измерений.

Калибровка проводится для задания масштаба. Фиксация — преобразование изображения в электрический сигнал для цифровой обработки и запоминания. Сегментирование — для

отделения пор от фона (поры имеют вид тёмных пятен на светлом фоне для нетравленных образцов). Площадь пор F_p по сформированному двоичному изображению, когда каждый элемент находится только в одном состоянии (исследуемое и фоновое), и пористость P_r , измеряемая в процентах, определялась как отношение

$$P_r = F_p / F_{\Sigma} \cdot 100\%,$$

где F_{Σ} — общая площадь видимого поля.

Исследование элементного состава производилось на сканирующем электронном микроскопе CamScan 4 (рис. 2.4).

Область возбуждения элементов — от B до U . Минимальный предел обнаружения элемента — 0,5%. Точный количественный анализ при содержании элемента — от 1%. Погрешность метода — 3...5 относительных процентов. Минимальное разрешение сканирующего электронного микроскопа CamScan 4 — 50 нм. Глубина проникновения электронного пучка в образец — 1 мкм.

Для исследования были выбраны образцы диаметром 10 мм и высотой 5...10 мм. При изготовлении шлифов необходимо было исключить из применения полирующие материалы, содержащие химические элементы, присутствие которых надо установить в исследуемых образцах. Шлифы тщательно промывались в спирте в ультразвуковой ванночке. Для стекания заряда, возникшего на поверхности при сканировании электронным пучком, на вакуумном посту S 150A SPUTTER COATER на образец методом катодного распыления наносилась проводящая плёнка золота.

Перед проведением исследования по программе количественного анализа необходимо было составить эталонный файл, для чего задавался ряд стандартных условий, которые затем легко воспроизводились и соблюдались при проведении количественного анализа.

В качестве калибровочного элемента был выбран никель (Ni).

При проведении анализа автоматически вводились поправки на поглощение, атомный номер и флуоресценцию.

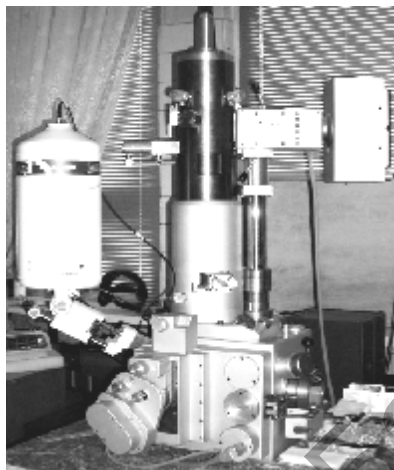


Рисунок 2.4 — Сканирующий электронный микроскоп CamScan 4 с энергодисперсионным микроанализатором INCA 350 фирмы Oxford Instruments (Англия)

Количественный анализ проводился по программе анализа данных 1, как указано в инструкции по эксплуатации программы ZAF-4/FLS. На экране дисплея анализатора записывался рентгеновский спектр образца. Затем спектр отправлялся в процессор, где

проходила его полная обработка с введением всех поправок. После этого процессор выдавал весовое и атомное процентное содержание всех названных элементов с распечаткой их на бумаге.

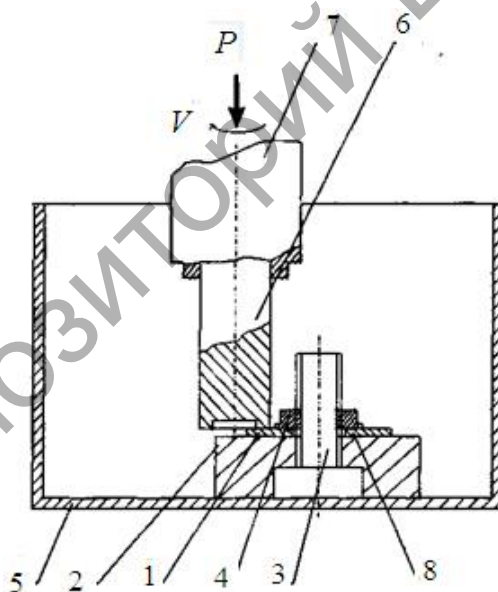
Трещинообразование оценивалось при помощи микроскопа. Количественным критерием являлась длина трещин на 1 мм^2 поверхности. Вначале измерялась видимая площадь поверхности образца под окуляром, а затем (путём перемещения стола с образцом вдоль направления трещин относительно перекрестия окуляра микроскопа) — длина трещин. Погрешность измерения составляла 5...8%. Рассчитывалось среднее арифметическое по пяти замерам.

2.4 Методики определения износостойкости покрытий и их изнашивания при фреттинг-коррозии

Процессы изнашивания определяются большим количеством факторов, таких, как физико-механические характеристики поверхностного слоя, давление, температура и скорость в зоне контакта трущихся поверхностей, конструктивные особенности узла трения, химическая активность среды, содержание и вид абразивных частиц и т. д. Для обеспечения точности и достоверности испытаний на износостойкость образцы с покрытиями должны испытываться с максимальной идентичностью всех параметров эксперимента. Данные требования реализуемы в условиях лабораторных исследований, однако окончательная оценка износостойкости как эксплуатационного свойства упрочнённой детали возможна только при проведении стендовых или производственных испытаний. В рамках проводимых исследований ставилась задача оценить износостойкость покрытий в различных условиях изнашивания: при граничном трении, трении с присутствием частиц абразива.

Износостойкость газотермических покрытий сравнивалась с износостойкостью оплавленного покрытия из широко используемого в практике газотермического напыления порошка ПГ-СР4 и углеродистой сталью 45 [65].

На начальном этапе исследований для предварительной оценки работоспособности покрытий проводили испытания их износостойкости на изготовленной в Белорусском национальном техническом университете (БНТУ) [141] установке торцевого трения (рис. 2.5), которая позволяет сократить время испытаний, обеспечивая варьирование в широких пределах величины удельной нагрузки. Образец 1 устанавливается на плоскую шлифованную подставку 2, продолжением которой является шпилька 3, и фиксируется специальной гайкой 4. Во избежание перекоса гайки в случае испытаний призматических образцов с противоположной стороны шпильки подкладывается опора 8, высота которой равна высоте образца. Весь узел крепления образцов смонтирован в ёмкости 5, которая может



1 — образец; 2 — подставка; 3 — шпилька; 4 — гайка;
5 — ёмкость; 6 — контртело; 7 — патрон; 8 — опора

Рисунок 2.5 — Схема экспресс-испытаний образцов с покрытиями на износостойкость

устанавливаться в различных положениях на столе станка, что позволяет проводить испытания в условиях жидких сред. В качестве контртела используется кольцо 6 с наружным диаметром 21 мм и толщиной стенки 1,5 мм, изготовленное из твёрдого сплава ВК-6, которое крепится в патроне 7. Величина износа оценивалась по результатам пяти замеров. Длительность испытания образцов на износостойкость устанавливалась такой, чтобы погрешность измерений не превышала 5% от величины износа.

Скорость изнашивания I , мкм / ч, определялась как среднее арифметическое пяти замеров по формуле

$$I = h / t,$$

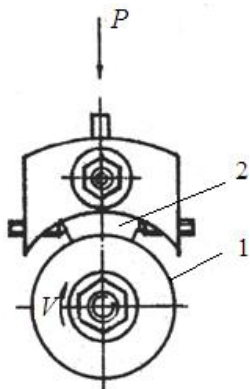
где h — линейный износ за период испытаний, мкм;

t — период испытаний, ч.

Комплексные испытания износостойкости покрытий из композиций, оптимизированных по своему составу и нанесённых на оптимальных режимах, проводили на машине трения модели 2070 СМТ-1 по стандартной методике по схеме «диск—колодка» в соответствии с требованиями ГОСТ 23.224-86 Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей. Контртело изготовлено из твёрдого сплава ВК-6 (рис. 2.6).

Для предварительных испытаний применяли образцы призматической формы размерами $8 \times 5 \times 40$; при испытаниях на машине трения — образцы в форме диска диаметром 50 мм и шириной 10 мм с центральным посадочным отверстием 12 мм, покрытие наносили на цилиндрическую поверхность. Перед испытаниями покрытия шлифовали для достижения шероховатости поверхности Ra 1,25 мкм, что соответствует шероховатости реальных деталей, работающих в трибосопряжениях.

Варьируемыми параметрами являлись величина удельной нагрузки p и скорость скольжения V , которые выбирались из условия максимального приближения эксперимента к условиям работы валов.



1 — испытуемый образец;
2 — диск-контртело

Рисунок 2.6 — Схема испытаний на машине 2070 СМТ-1

Время и при предварительных, и при комплексных испытаниях принималось таким, чтобы путь трения для образцов, исследуемых на разных режимах, был одинаковым и составлял $3 \cdot 10^4$ м при трении без смазки и со смазкой при наличии абразива.

Для измерения износа был выбран метод профилографирования. Износ определялся путём измерения глубины образовавшейся канавки профилографом-профилометром модели 252. Замеры производились в пяти сечениях канавки, а затем рассчитывалось их среднее арифметическое. При комплексных испытаниях на машине трения 2070 СМТ-1 регистрировался момент сил трения $M_{тр}$, Н · м, и определялся коэффициент трения f по формуле

$$f = \frac{2M_{тр}}{D P},$$

где D — диаметр образца, м;

P — величина приложенной нагрузки, Н.

Износостойкость упрочнённых поверхностей U определялась как величина, обратная величине износа, по формуле

$$U = I/h,$$

где h — величина износа, мкм.

Для определения степени влияния скорости скольжения и удельной нагрузки на износ по результатам испытаний на машине трения 2070 СМТ-1 для каждой композиции были разработаны регрессионные модели.

При выборе оборудования и методики испытаний для проведения исследований фреттинг-коррозии необходимо выдер-

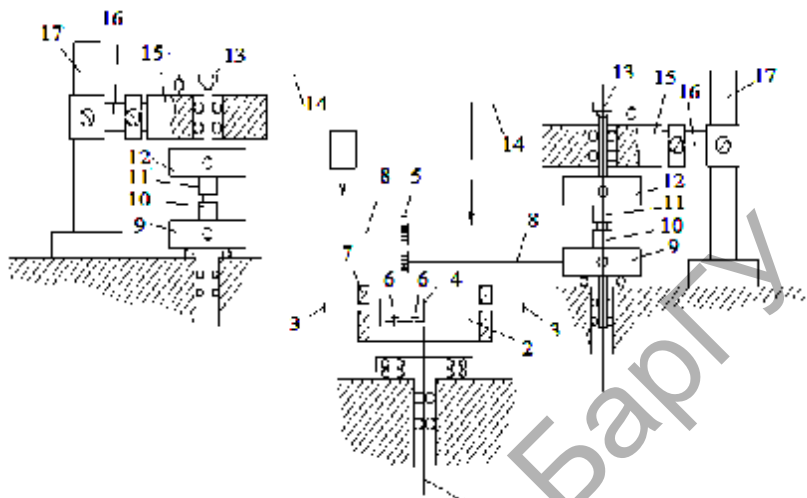
жать ряд требований. С одной стороны, имитация фреттинг-коррозии в лабораторных условиях должна максимально приближаться к условиям возникновения этого вида поверхностного разрушения в реальных конструкциях. С другой — выбранная методика должна давать возможность сопоставления полученных результатов с данными других работ. В связи со специфичностью условий возникновения фреттинг-коррозии к испытательным устройствам предъявляются следующие требования:

- свободное от люфтов крепление образцов в соответствующих зажимных устройствах;
- жёсткость к перемещению образцов относительно друг друга и малая степень деформации устройства;
- наличие виброскользящего движения, регулируемой частоты и амплитуды;
- наличие контролируемой нормальной силы для создания необходимой удельной нагрузки.

По характеру контакта поверхностей применяющиеся для исследования фреттинг-коррозии установки и приборы можно разделить на два типа: установки, в которых осуществляется точечный или линейный контакт (шар—плоскость, цилиндр—плоскость); установки для создания вибраций в контакте плоских поверхностей [12].

Перечисленным требованиям к установкам и характеру контакта поверхностей отвечает экспериментальная установка, разработанная и изготовленная в БНТУ (рис. 2.7).

От двухскоростного электродвигателя через сменные шкивы и клиноременную передачу вращение передаётся к валу-шпинделю 1, на котором установлена каретка 2. По внутренней поверхности каретки при помощи винтов 3 может перемещаться подвижная каретка 4 с осью 5. Фиксация каретки 4 осуществляется винтами 6. Для устранения дисбаланса амплитуды микроскольжения в конструкции механизма установки предусмотрено подвижное кольцо 7. Эксцентричное движение оси 5 передаётся посредством шатунов 8 головками 9, оси вращения которых смещены относительно точки крепления шатунов. В головке с помощью подвижных губок закреплён подвижный образец 10.



1 — вал-шпиндель; 2 — каретка; 3 — винт; 4 — подвижная каретка; 5 — ось; 6 — винт; 7 — подвижное кольцо; 8 — шатун; 9 — головка; 10 — подвижный образец (контртело); 11 — неподвижный образец; 12 — подвижная головка; 13 — сферический подпятник; 14 — рычаг; 15 — самоустанавливающийся узел; 16 — консоль; 17 — стойка

Рисунок 2.7 — Кинематическая схема установки для испытания на фреттинг-коррозию

Узел крепления неподвижного образца 11 и подвижной головки 12 аналогичен. Головка 12 имеет возможность вертикально перемещаться в направляющих консоли 16, установленной на стойке 17. Нагружение образцов производится с помощью рычага 14 и грузов через сферические подпятники 13. Узел 15 консоли даёт возможность самоустановки образцов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Данная установка позволяет производить испытания при амплитуде относительного микроскольжения 0...2 000 мкм, частоте колебаний 6...100 Гц (за счёт установки шкивов и двухскоростного двигателя), удельной нагрузке до 400 МПа.

В установке положено в основу торцевое трение контактирующих образцов, выполненных в виде полого кольца (подвижный образец) и цилиндра (неподвижный образец) (рис. 2.8).

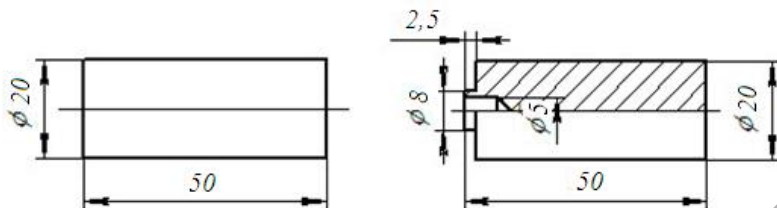


Рисунок 2.8 — Образцы для испытаний на износостойкость при фреттинг-коррозии

На установке испытываются две пары образцов (эталон и испытуемый образец). Выбранные наружный и внутренний диаметры образцов позволяют свести к минимуму эффект градиента скорости в радиальном направлении. Испытания проводились согласно ГОСТ 23.211-80 Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний металлов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии.

Определение оценок и доверительных интервалов, полученных результатов износа образцов при фреттинг-коррозии проводили согласно ГОСТ 11.004-74 Прикладная статистика. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров нормального распределения.

Выбор параметров проведения испытаний осуществлялся с учётом теоретических исследований фреттинг-коррозии и условий работы валов бумагоделательного оборудования.

2.5 Методика обработки экспериментальных данных

В целях определения влияния состава композиции на прочность сцепления и износостойкость полученных покрытий, оптимизации их составов, оптимизации режимов подготовки поверхности и напыления применяли методы планирования эксперимента.

Для построения диаграмм «состав—свойство» использовали симплекс-решётчатые планы, предложенные Н. Scheffe [142—144].

При планировании эксперимента для решения задач на диаграммах «состав—свойство» предполагалось, что изучаемое свойство является непрерывной функцией аргументов и может быть с достаточной точностью представлено полиномами.

При изучении свойств смеси, зависящих только от соотношений компонентов, факторное пространство представляет собой правильный симплекс ($q - 1$). Для системы выполняется соотношение

$$\sum_{i=1}^q x_i = 1,$$

где q — количество компонентов;

x_i — количество компонента в смеси.

При q , равном 3, правильный симплекс — равносторонний треугольник, каждая точка которого отвечает одному определённому составу тройной системы, вершины — чистым веществам, стороны — двойным системам. Экспериментальные точки (q, n) представляют — решётку на симплексе, где q — количество компонентов; n — степень полинома. По каждому компоненту имеется $(n + 1)$ одинаково расположенных уровней x_i , равных $0; 1/n; 2/n; \dots 1$; взяты все возможные комбинации. Так, при n , равном 3, должны быть использованы следующие уровни варьирования каждого из факторов: $0; 1/2; 1/3$ и 1 .

Для исследований использовался симплекс-центроидный план с добавлением внутренних точек. При его применении точки плана соответствовали всем перестановкам чистых смесей (например, $1\ 0\ 0; 0\ 1\ 0; 0\ 0\ 1$), перестановкам бинарных смесей ($S\ S\ 0; S\ 0\ S; 0\ S\ S$), перестановкам с тремя одинаковыми по пропорции компонентами и так далее. Например, для трёх факторов симплекс-центроидный план состоял из следующих точек: вершины, центры сторон, центр треугольника. Добавление внутренних точек позволяет ровно заполнить экспериментальную область, определённую на треугольнике. Например, для трёх факторов можно добавить следующие внутренние точки: $1/6; 2/3$.

Записав координаты точек симплексной решётки, получили матрицу планирования эксперимента. Индексы у свойства смеси указывали на содержание каждого компонента в смеси.

Далее получали уравнения регрессии, являющиеся математическим описанием зависимости «состав—прочность сцепления, износостойкость» системы. После определения коэффициентов уравнения регрессии проводили статистический анализ полученных результатов — проверку адекватности уравнения и построение доверительных интервалов значений отклика, предсказываемых по уравнению регрессии. Для проверки адекватности ставили опыты в дополнительных, так называемых контрольных точках. Их число и координаты связаны с постановкой задачи и особенностями эксперимента.

Использование методов планирования эксперимента позволяет значительно сократить объём эксперимента при изучении многокомпонентных систем, при этом предоставляется возможность графической интерпретации результатов.

В качестве функций отклика выбраны прочность сцепления покрытия с основой и износостойкость напылённых покрытий.

Планирование эксперимента при исследовании технологических параметров подготовки поверхности, напыления и изнашивания покрытий проводили по модели полного факторного эксперимента, метод которого (как и другие методы планирования эксперимента) позволяет ограниченным числом экспериментов получить математическую модель, связывающую исследуемый фактор технологического процесса (параметр оптимизации) с исходными параметрами (входные параметры).

Метод требует, чтобы все независимые переменные, влияющие на процесс, менялись хотя бы на двух уровнях: минимальном и максимальном.

Количество необходимых экспериментальных точек для полного факторного эксперимента N принимали равным 2^k , где k — количество исследуемых переменных.

На первом этапе планирования эксперимента выбирались основные входные параметры, сильно влияющие на параметр оптимизации. Затем определялись пределы их изменения и составлялись таблицы исходных данных.

Для получения достоверных данных, возможности статистических оценок точности и воспроизводимости экспериментов необходимо их неоднократное повторение. Кроме того, чтобы исключить влияние систематических погрешностей, эксперимент рандомизируется, т. е. опыты проводятся в случайном порядке. Чаще всего для этого используется таблица случайных чисел.

При исследовании прочности сцепления, триботехнических и физико-механических свойств напылённых покрытий имеет место погрешность измерений, обусловленная разбросом экспериментальных данных. Как правило, величина разброса определяется по нормальному закону и характеризуется средним арифметическим, найденным из вариационного ряда по формуле

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i.$$

Уровень случайной погрешности S оценивают по выборочному среднеквадратичному отклонению

$$S = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Для исключения влияния грубых ошибок на результаты и оценки принадлежности первого (y_1) и последнего (y_n) членов вариационного ряда к нормальной совокупности и принятия решения об исключении или сокращении y_1 , y_n в составе выборки (согласно ГОСТ 11.002-73 Прикладная статистика. Правила оценки нормальности результатов наблюдений) находили отношения

$$U = \frac{y - y_1}{S} \quad \text{или} \quad U_n = \frac{y_n - y}{S}.$$

В случае если $U_1 \geq h$ и $U_n \geq h$ (где h — табличная величина из ГОСТ 11.002-73), то данное экспериментальное значение

считали промахом и исключали из вариационного ряда, который после этого считался очищенным от грубых ошибок измерений и в дальнейшем подвергался статистической обработке с использованием методов математической статистики [145].

При разработке моделей и их оптимизации использовались пакет статистического анализа Statistica 6.0 фирмы StatSoft (США) и пакет программ MathCAD компании Math Works Inc. (США).

Репозиторий БарГУ

РАЗДЕЛ 3
ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

3.1 Расчёт максимальной удельной нагрузки, действующей на опорную поверхность вала

Для определения работоспособности крупногабаритных тяжелонагруженных валов с разрабатываемыми композиционными покрытиями, с точки зрения обеспечения требуемой прочности сцепления их с основой, необходимо определить максимальную величину удельной нагрузки, действующей на вал.

Рассмотрим сопряжённую пару «опорная поверхность вала—втулка подшипника» (рис. 3.1). Для исследования кинетики изнашивания рассматриваемой трибопары необходимо оценить начальную удельную нагрузку $p_0(\alpha)$ и установить закон её перераспределения при изнашивании [6; 7].

Данную задачу можно решить как плоскую задачу теории упругости [146]. При расчёте принимаем форму опорной поверхности вала 1 и втулки подшипника (далее втулка) 2 круговой. Между валом и втулкой имеет место радиальный зазор δ , равный $R_2 - R_1$ (рис. 3.2). В начальный момент времени радиальный зазор можно принять равным нулю, так как втулка устанавливается на вал с натягом. В процессе эксплуатации, вследствие износа, зазор между валом и втулкой увеличивается.

Уравнение задачи для рассматриваемого случая имеет вид

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1+\chi_1}{8\pi\mu_1} + \frac{1+\chi_2}{8\pi\mu_2} \right) \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} p'(\varphi) \cdot \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha - \varphi}{2} \right) d\varphi = \left(\frac{\chi_1 - 1}{4\mu_1} - \frac{\chi_2 - 1}{4\mu_2} \right) p(\alpha) + \\ & + \frac{Q_{2н}}{2\pi R_1 L} \frac{\mu_2 + \chi_2 \mu_1}{\mu_1 \mu_2} \cos \alpha + \frac{1 + \chi_2}{8\pi\mu_2} \cdot \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} p'(\varphi) d\varphi + \frac{\delta}{R_1}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

Втулка подшипника
(буксовая втулка)

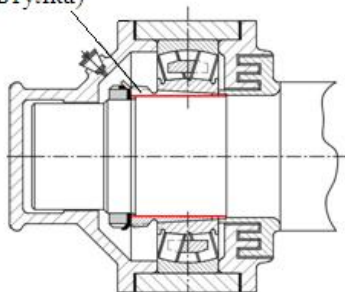


Рисунок 3.1 — Схема подшипникового узла

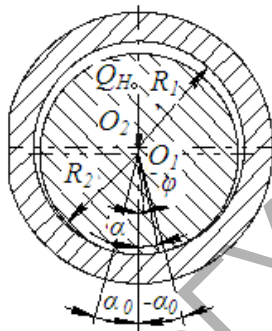


Рисунок 3.2 — Расчётная схема опоры

где p и p' — удельная нагрузка и её дифференцирование по соответствующей переменной;

R_1 — радиус нижнего вала, равный $D_H / 2$, мм;

R_2 — радиус втулки, мм;

α — угловая текущая координата, град;

α_0 — полуугол контакта, град;

δ — радиальный зазор, мм;

ϕ — вспомогательная координата, град;

L — длина втулки, мм;

χ, μ — параметры, равные $\chi_i = 3 - 4\nu_i$ и $\mu_i = \frac{E_i}{2(1 + \nu_i)}$ соответ-

ственно, где i для вала равно 1; i для втулки равно 2,

ν_i — коэффициент Пуассона, E_i — модуль упругости [147].

Условие равновесия цилиндра вычисляется по формуле

$$\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} p(\alpha) \cos \alpha d\alpha = \frac{Q_{2H}}{R_1 l}. \quad (3.2)$$

После соответствующих преобразований исходных уравнений (3.1) и (3.2) и численного их решения при условии

$0 \leq \delta/R_2 \leq 0$ находится зависимость коэффициента нагруженности и удельной нагрузки в произвольной точке зоне контакта при заданном значении угла контакта.

Коэффициент нагруженности β определяется по следующим формулам:

$$\beta = \frac{Q_{2н}}{8\pi\delta L} \left(\frac{1+\chi_1}{\mu_1} + \frac{1+\chi_2}{\mu_2} \right) \text{ или } \beta = \frac{Q_{2н}}{\pi\delta L} \eta,$$

где $\eta = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)$ — упругая постоянная материалов [147].

Расчёт параметров $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, b$ осуществляется следующим образом:

$$\gamma_1 = \frac{(1-\chi_2)\mu_1 - (1-\chi_1)\mu_2}{(1+\chi_2)\mu_1 + (1+\chi_1)\mu_2};$$

$$\gamma_2 = \frac{\mu_2 + \chi_2\mu_1}{(1+\chi_2)\mu_1 + (1+\chi_1)\mu_2};$$

$$\gamma_3 = \frac{(1+\chi_2)\mu_1}{(1+\chi_2)\mu_1 + (1+\chi_1)\mu_2};$$

$$b = \text{ctg} \frac{\alpha_0}{2}.$$

Определяем коэффициенты по зависимостям

$$\frac{1}{Y_0} = 0,393 - 0,72\gamma_1 - 0,04\gamma_1^2 + (0,051 - 1,456\gamma_1)b + b^2;$$

$$\frac{1}{Y_1} = \frac{1}{Y_2} = 1 - 2,162\gamma_1 + 0,087\gamma_1^2 - (0,893\gamma_1 + 0,07\gamma_1^2)b + b^2;$$

$$\frac{1}{Y_3} = 1,812 - 3,787\gamma_1 - 0,034\gamma_1^2 - (0,145 + 0,251\gamma_1 - 0,014\gamma_1^2)b + b^2.$$

Связь коэффициента нагруженности β с полууглом контакта α_0 вычисляется по формуле

$$\beta = \frac{1}{\frac{(1 - \gamma_3 \gamma_2 \gamma_2)(1 - \gamma_3 \gamma_0)}{\gamma_2} - 4 \gamma_2 \gamma_3 \gamma_1}.$$

Зависимость нагрузки $Q_{2н}$ от коэффициента нагруженности определяется следующим образом

$$Q_{2н} = 8\pi \delta L \beta \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1 (1 + \chi_1) + \mu_2 (1 + \chi_2)}.$$

Построив зависимость $Q_{2н} = Q_{2н}(\alpha_0)$ по величине заданной нагрузки $Q_{2н}$, найдём половину угла контакта α_0 . Расчёт α_0 полуугла контакта по формуле Герца таков:

$$\alpha_0 = \arcsin \sqrt{\frac{2Q_{2н}}{\pi \delta L} \left(\frac{1 - \nu_1}{\mu_1} + \frac{1 - \nu_2}{\mu_2} \right)} = \arcsin \sqrt{\frac{4Q_{2н}}{\pi \delta L} \eta}.$$

По заданной величине нагрузки $Q_{2н}$ и по углу контакта $2\alpha_0$ находим среднее по проекции площадки контакта давление в зоне контакта по формуле

$$q = \frac{Q_{2н}}{2R_1 L \sin \alpha_0}.$$

Максимальную удельную нагрузку p_{\max} можно выразить следующим образом:

$$p_{\max} = kp,$$

где k — коэффициент, учитывающий отличие максимальной удельной нагрузки, определяемый по формуле

$$k = 2 \left(\frac{b}{\beta} + \gamma_3 c_0 \right) \frac{0,318}{(0,106 - 1,8\gamma_1 b + b^2)} + \frac{1,28\gamma_2 b}{0,336 - 0,434\gamma_1 - 0,176\gamma_1^2 + \frac{1,28\gamma_2 b}{(0,077 - 1,67\gamma_1 + 0,125\gamma_1^2)b + b^2}},$$

где c_0 — поправочный коэффициент, вычисляемый по формуле

$$c_0 = \frac{Y_0}{Y_2} (1 - 4\gamma_2 Y_3) + 4\gamma_2 Y_1;$$

p — средняя удельная нагрузка на опору вала, вычисляемая по формуле $p = \frac{Q_{2н}}{2S}$, где S — площадь контакта «опорная поверхность вала — втулка подшипника», определяемая по формуле $S = \pi R_1 \frac{2\alpha_0}{180^\circ} L$.

Коэффициент k учитывает отличие максимальной удельной нагрузки от её среднего значения.

Пример. Расчёт максимальной удельной нагрузки, действующей на опорную поверхность прессового вала массой 4 (с применением пакета математических программ MathCAD)

Исходные данные:

вес верхнего вала (с подшипниками), $G_{в.в}$, Н:	39 000;
вес нижнего вала (с подшипниками), $G_{н.в}$, Н:	40 000;
суммарное усилие дополнительного прижима с лицевой и приводной сторон, P , Н:	26 000;
диаметр верхнего вала, $D_{в.в}$, мм:	550;
диаметр нижнего вала, $D_{н.в}$, мм:	600;
величина смещения между валами по горизонтали, m , мм:	100;
длина рабочей части вала, b , мм:	2 000;
длина шейки под втулку подшипника, L , мм:	120;
диаметр цапфы вала под подшипник, d , мм:	120.

Линейное давление по всей длине рабочей части вала вычисляется по формуле

$$q = \frac{G_{в.в} + P}{b}.$$

Нагрузка в горизонтальной плоскости $Q_{гор}$ вдоль рычагов определяется следующим образом:

$$Q_{гор} = (G_{в.в} + P)tg\gamma = Q_{ц} \cdot \sin \gamma,$$

где γ — угол между вертикалью и линией, соединяющей центры валов.

Из треугольника АОВ (см. рис. 1.4, б) находим $\sin(\gamma)$ по формуле

$$\sin(\gamma) = \frac{2m}{D_{н.в} + D_{в.в}}.$$

Тогда угол γ равен 9,964 град, угол γ рад: $\gamma_{rad} := a \sin(\gamma)$.

Давление между валами $Q_{ц}$, Н, направленное по линии соединения центров нижнего и верхнего валов, высчитывается по формуле

$$Q_{ц} := \frac{G_{в.в} + P}{\cos(\gamma_{rad})}.$$

Нагрузка на оба подшипника нижнего вала $Q_{2н}$, Н (см. рис. 1.4, в) определяется по формуле

$$Q_{2н} = \sqrt{G_{н.в}^2 + Q_{ц}^2 + 2 \cdot G_{н.в} \cdot Q_{ц} \cdot \cos(\gamma_{rad})}.$$

Реакции опоры R , Н находятся по формуле

$$R = \frac{Q_{2н}}{2}.$$

Определение максимальной удельной нагрузки

Исходные данные:

радиус вала, R_1 , мм:	$d/2$;
длина втулки, l , мм:	120;
общая нагрузка (нагрузка на оба подшипника нижнего вала),	$1,056 \cdot 10^5$;

$Q_{2н}$, Н:

текущая угловая координата α ;
 полуугол контакта α_0 ;
 радиальный зазор δ ;
 вспомогательная координата φ ;

коэффициент Пуассона цапфы вала, ν_1 :	0,24;
коэффициент Пуассона втулки, ν_2 :	0,25;
модуль упругости цапфы вала, E_1 :	$2,1 \cdot 10^5$;
модуль упругости втулки, E_2 :	$2,3 \cdot 10^5$;

χ, μ — параметры, определяемые по следующим зависимостям:

$$\chi_1 := 3 - 4\nu_1; \quad \mu_1 := \frac{E_1}{2(1+\nu_1)}; \quad \chi_2 = 3 - 4\nu_2; \quad \mu_2 = \frac{E_2}{2(1+\nu_2)}.$$

Определяем угол контакта K в градусах и радианах (учитывая, что критический угол контакта $2\alpha_0$ равен 10°) по формуле

$$K = 5i = 0,001745 \alpha_0 = 5\alpha_{0i+1} = \alpha_{0i} + 5\alpha_{0i} \text{rad}_i = \alpha_{0i} \frac{\pi}{180}.$$

Расчёт коэффициентов Y_0, Y_1, Y_2, Y_3 и параметров $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, b$ для определения коэффициента нагруженности β проводим следующим образом:

$$b_i = \frac{\cot(\alpha_{0i} \text{rad}_i)}{2}; \quad \gamma_1 = \frac{(1-\chi_2)\mu_1 - (1-\chi_1)\mu_2}{(1+\chi_2)\mu_1 + (1+\chi_1)\mu_2}; \quad Y_{0i} = 0;$$

$$\gamma_2 = \frac{\mu_2 + \chi_2\mu_1}{(1+\chi_2)\mu_1 + (1+\chi_1)\mu_2}; \quad \gamma_3 = \frac{(1+\chi_2)\mu_1}{(1+\chi_2)\mu_1 + (1+\chi_1)\mu_2};$$

$$Y_{0i} = \frac{1}{0,393 - 0,702\gamma_1 - 0,04\gamma_1^2 + (0,051 - 1,456\gamma_1)b_i + (b_i)^2};$$

$$Y_{1i} = \frac{1}{1 - 2,162\gamma_1 + 0,087\gamma_1^2 - (0,893\gamma_1 + 0,07\gamma_1^2)b_i + (b_i)^2}; \quad Y_{2i} = Y_{1i};$$

$$Y_{3i} = \frac{1}{1,812 - 3,787\gamma_1 - 0,034\gamma_1^2 - (0,145 + 0,251\gamma_1 - 0,014\gamma_1^2)b_i + (b_i)^2};$$

$$c_{0i} = \left[\frac{1}{Y_{2i}} (1 - 4\gamma_2 Y_{3i}) \right] Y_{0i} + 4\gamma_2 Y_{1i};$$

$$Y_0 = \begin{pmatrix} 0.03 \\ 0.118 \\ 0.256 \\ 0.436 \\ 0.645 \\ 0.872 \end{pmatrix} \quad Y_1 = \begin{pmatrix} 0.03 \\ 0.112 \\ 0.227 \\ 0.355 \\ 0.48 \\ 0.592 \end{pmatrix} \quad Y_3 = \begin{pmatrix} 0.029 \\ 0.104 \\ 0.197 \\ 0.288 \\ 0.366 \\ 0.428 \end{pmatrix} \quad c_0 = \begin{pmatrix} 1.011 \\ 1.059 \\ 1.137 \\ 1.23 \\ 1.32 \\ 1.396 \end{pmatrix}$$

Определение коэффициента нагруженности β проводим по формуле

$$\beta_i = \frac{1}{\frac{1}{Y_{2i}} \left[\frac{1}{(1-Y_{3i}\gamma_2 Y_{2i})(1-\gamma_3 Y_{0i})} \right] - 4\gamma_2 \gamma_3 Y_{1i}} \beta = \begin{pmatrix} 0.03 \\ 0.121 \\ 0.28 \\ 0.559 \\ 1.144 \\ 3.188 \end{pmatrix}$$

Определение коэффициента k , учитывающего отличие максимальной удельной нагрузки от её среднего значения, проводим по формуле

$$k_i = 2 \left[\left(\frac{1}{\beta_i} \right) b_i + \gamma_3 c_{0i} b_i \right] \frac{0.318}{0.106 - 1.8\gamma_1 b_i + (b_i)^2} + \left[\frac{1}{0.366 - 0.434\gamma_1 - 0.176\gamma_1^2 + (0.077 - 1.67\gamma_1 + 0.125\gamma_1) b_i + (b_i)^2} \right] (1.28\gamma_2 b_i)$$

Площадь контакта S_i , мм², вычисляем из выражения

$$S_i = \pi \frac{d}{2} \frac{2\alpha_{0i}}{180} L.$$

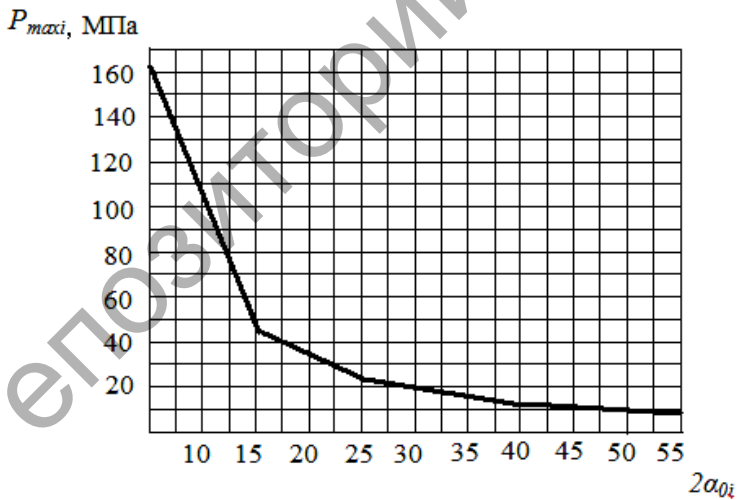
Средняя удельная нагрузка p_i , МПа, определяется по формуле

$$p_i = \frac{R}{S_i} p = \begin{pmatrix} 42.027 \\ 21.014 \\ 14.009 \\ 10.507 \\ 8.405 \\ 7.005 \end{pmatrix}$$

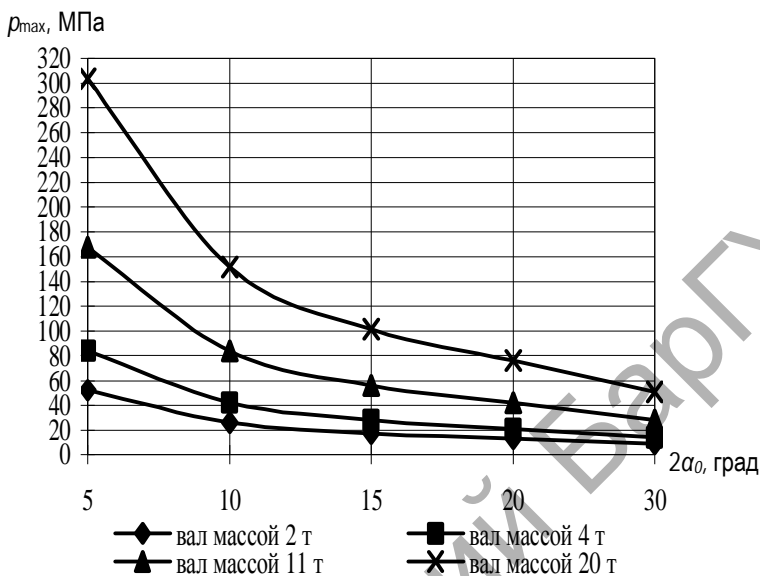
Максимальная удельная нагрузка p_{\max_i} рассчитывается по формуле

$$p_{\max_i} = k_i p_i.$$

С помощью пакета MathCAD были определены зависимости нагрузок от угла контакта для валов БДМ (рис. 3.3).



a)



a — для нижнего вала массой 4 т; *b* — для валов различной массы

Рисунок 3.3 — Зависимость максимальной удельной нагрузки от угла контакта

Из графика (см. рис. 3, б) видно, что для валов массой 4 т при угле контакта 10° удельная нагрузка не превышает 50 МПа (см. пример расчёта), т. е. нанесение покрытий газотермическими методами на опорную поверхность вала допустимо при условии обеспечения прочности сцепления не менее 50...60 МПа. Для валов массой выше 4 т, чтобы обеспечить работоспособность вала с покрытием, необходимо применение комбинированных методов упрочнения, которые позволяют получить прочность сцепления на порядок выше, чем при газотермическом напылении [7].

3.2 Оптимизация составов композиций для напыления покрытий

На начальном этапе исследований ставилась задача экспериментально изучить свойства газотермических покрытий из композиций, составленных из материалов, предложенных в разделе 2.2. Для исследований, с учётом получения прогнозируемых физико-механических свойств напылённых покрытий, были составлены композиции из порошков (табл. 3.1 и 3.2). Важно определить применимость данных композиций для технологии газотермического напыления без последующего оплавления покрытий и при положительном результате найти соотношения компонентов смеси, обеспечивающих наибольшую прочность сцепления и износостойкость при минимальной себестоимости [148—150].

Для обоснования выбора составов композиций проводились экспресс-испытания на износостойкость (рис. 3.4), а также визуальный контроль полученных покрытий на отсутствие их отслоения от основы. Диаграмма показывает, что износостойкость полученных покрытий превышает износостойкость стали 45 и сравнима с износостойкостью оплавленного покрытия из сплава ПГ-СР4, это свидетельствует о правильности выбора составов композиций. Для проведения дальнейших исследований были выбраны наиболее износостойкие композиции № 1 и № 2, кроме того, на некоторых образцах наблюдалось отслоение покрытий, напылённых из композиции № 3, что не гарантирует работоспособности детали с таким покрытием [151].

Т а б л и ц а 3.1 — Предложенные композиции для газотермического напыления

Номер композиции	Состав композиции
1	ПТ-НА-01 + ПГ-19М-01 + ПР-Х4Г2Р4С2Ф
2	ПР-НД42СР + ПР-Х4Г2Р4С2Ф + ПТ-НА-01
3	ПТ-ЮНХ16СР3 (1/2) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (1/2)

Т а б л и ц а 3.2 — Химический состав порошков

Марка порошка	Химический состав
ПТ-НА-01	основа Ni; 4,0...5,5% Al
ПР-Х4Г2Р4С2Ф	основа Fe; 3,7% Cr; 2,2% Mn; 3,8% B; 2,5% Si; 0,8% V
ПГ-19М-01	основа Cu; 4% Fe; 8,5...10,5% Al
ПР-НД42СР	основа Ni-Cu; 42,5% Cu; 0,2% C; 0,9% Si; 1% B; до 3% Fe
ПТ-ЮНХ16СР2	основа Ni; 0,7% C; 16% Cr; 3,2% Si; 2,6% B; 1,2% Al

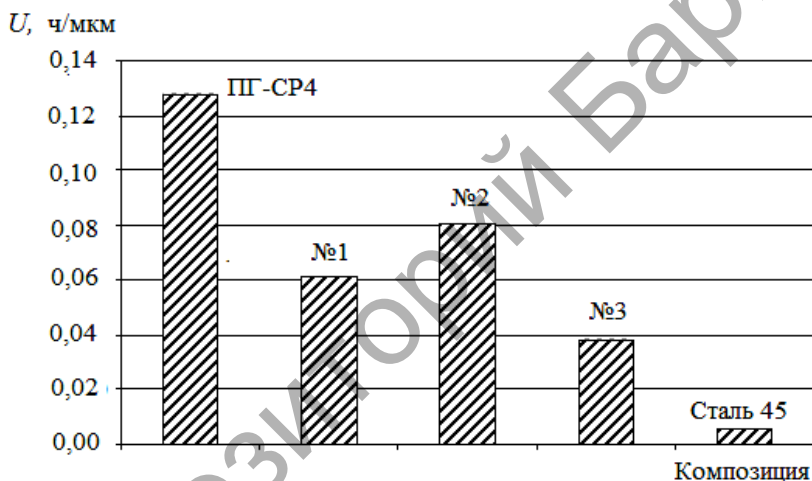


Рисунок 3.4 — Диаграмма износостойкости

Для выявления степени влияния компонентов композиции на прочность сцепления покрытия с основой и его износостойкость проводилось планирование эксперимента. При обработке результатов планирования эксперимента и получения зависимости функции отклика от входящих факторов применялась стандартная программа — Statistica 6.0.

Оптимизация состава композиции ПТ-НА-01 + ПГ-19М-01 + ПР-Х4Г2Р4С2Ф. В качестве независимых переменных фак-

торов принято содержание порошков: ПТ-НА-01(X_1); ПГ-19М-01(X_2); ПР-Х4Г2Р4С2Ф(X_3). Параметром оптимизации являлась прочность сцепления покрытия с основой $\sigma_{сц}$ (Y_1), при обеспечении износостойкости U более 0,1 ч / мкм (Y_2).

В таблице 3.3 приведены уровни факторов и их кодированные значения, соответствующие симплекс-центроидному плану, а в таблице 3.4 — матрица планирования и результаты эксперимента.

План эксперимента на основе матрицы планирования трёх-факторного эксперимента на пяти уровнях включает 10 опытов.

Т а б л и ц а 3.3 — Уровни варьирования компонентов

Обозначение	Исследуемый фактор	Уровни факторов					
		0	1/6	1/3	1/2	2/3	1
X_1	ПТ-НА-01	0,20	0,23	0,27	0,30	0,33	0,40
X_2	ПГ-19М-01	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,60
X_3	ПР-Х4Г2Р4С2Ф	0,20	0,23	0,27	0,30	0,33	0,40

Т а б л и ц а 3.4 — Матрица планирования эксперимента и функции отклика

Номер опыт	Матрица планирования в кодированных значениях			Матрица планирования в натуральных значениях, %			Функция отклика	
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2
1	1	0	0	0,400	0,400	0,200	44,700	0,057
2	0	1	0	0,200	0,600	0,200	45,800	0,110
3	0	0	1	0,200	0,400	0,400	39,800	0,082
4	1/2	1/2	0	0,300	0,500	0,200	43,200	0,076
5	1/2	0	1/2	0,300	0,400	0,300	49,500	0,108
6	0	1/2	1/2	0,200	0,500	0,300	49,200	0,141
7	1/3	1/3	1/3	0,270	0,470	0,270	55,500	0,122
8	2/3	1/6	1/6	0,330	0,430	0,230	49,000	0,079
9	1/6	2/3	1/6	0,230	0,530	0,230	52,200	0,120
10	1/6	1/6	2/3	0,230	0,430	0,330	53,640	0,132

После обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, отражающие степень влияния состава композиции на прочность сцепления покрытия с основой и износостойкость:

$$Y_1 = 44,1205X_1 + 46,0205X_2 + 40,386X_3 + 29,013X_1X_3 + 27,213X_2 \times X_3 + 200,2235X_1X_2X_3;$$

$$Y_2 = 0,0538X_1 + 0,1101X_2 + 0,0849X_3 + 0,1511X_1X_3 + 0,186X_2X_3.$$

Графические изображения уравнений регрессии на плоскости и в объёме для выбранных функций отклика (прочность сцепления и износостойкость), а также графики оптимизации приведены на рисунках 3.5—3.7.

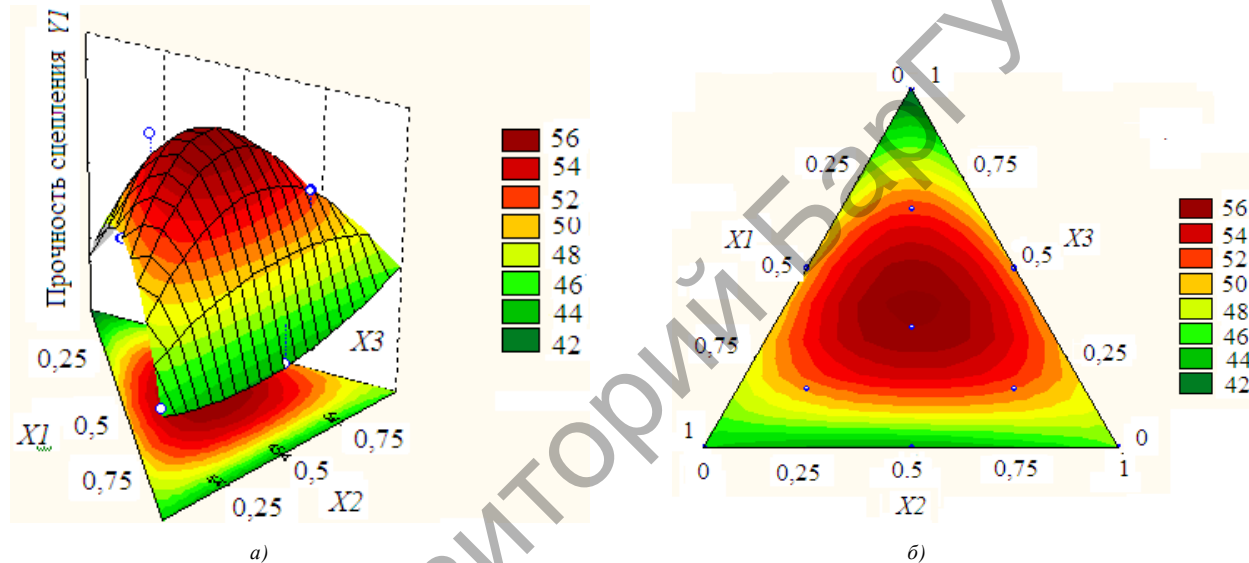
Оптимальные соотношения при напылении композиции № 1 следующие:

$$X_1 = 0,309; \quad X_2 = 0,327; \quad X_3 = 0,364.$$

Расчётное значение прочности сцепления при данном соотношении компонентов и при износостойкости U более 0,1 ч / мкм равно 57,25 МПа. Установлено, что все модели адекватны при 5%-м уровне значимости по критерию Фишера.

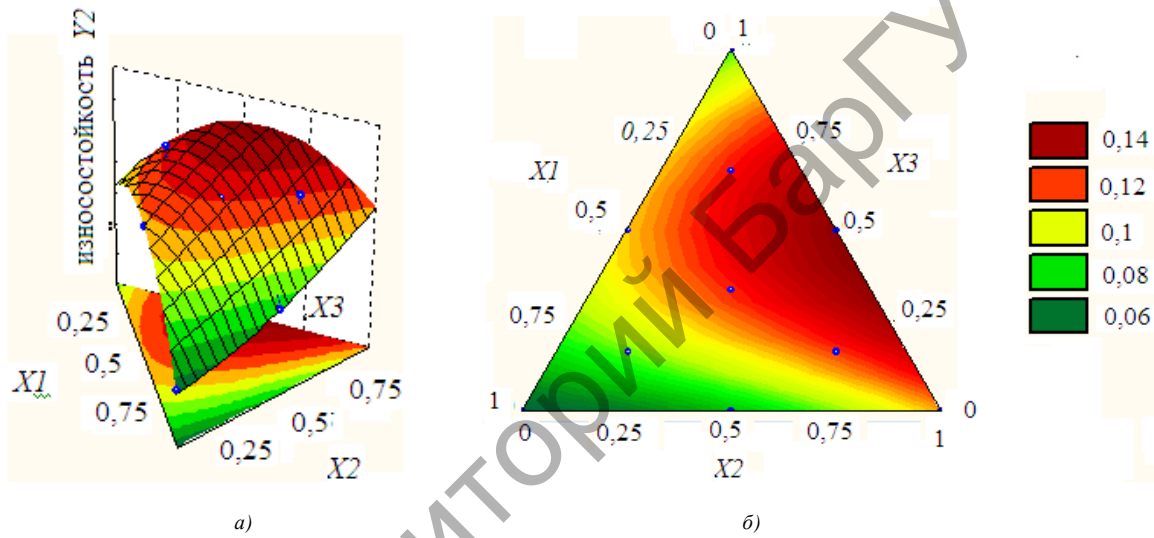
Оптимизация состава композиции ПР-НД42СР + ПР-Х4Г2Р4С2Ф + ПТ-НА-01. В качестве независимых переменных факторов принято содержание порошков: ПТ-НА-01 (X_1); ПР-Х4Г2Р4С2Ф (X_2); ПР-НД42СР (X_3). Параметром оптимизации являлась прочность сцепления покрытия с основой $\sigma_{сц}$ (Y_1) при обеспечении износостойкости U более 0,1 ч / мкм (Y_2).

В таблице 3.5 приведены уровни факторов и их кодированные значения, соответствующие симплекс-центроидному плану, а в таблице 3.6 — матрица планирования и результаты эксперимента.



a — поверхность отклика в объёме; *b* — поверхность отклика на плоскости

Рисунок 3.5 — График зависимости прочности сцепления покрытия с основой от состава композиционного материала № 1



a) — поверхность отклика в объёме; *б)* — поверхность отклика на плоскости

Рисунок 3.6 — График зависимости износостойкости покрытий от состава композиционного материала № 1

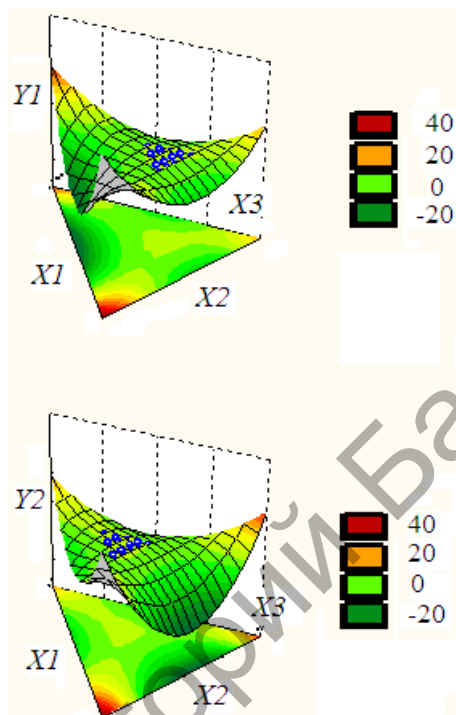


Рисунок 3.7 — Поверхность оптимизации состава композиционного материала № 1 для обеспечения максимальной прочности сцепления и износостойкости

Т а б л и ц а 3.5 — Уровни варьирования компонентов композиции

Обозначение	Исследуемый фактор	Уровни факторов					
		0	1/6	1/3	1/2	2/3	1
X ₁	ПТ-НА-01	0,20	0,23	0,27	0,30	0,33	0,40
X ₂	ПР-Х4Г2Р4С2Ф	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,60
X ₃	ПР-НД42СР	0,20	0,23	0,27	0,30	0,33	0,40

Т а б л и ц а 3.6 — Матрица планирования эксперимента и функции отклика

Опыт	Матрица планирования в кодированных значениях			Матрица планирования в натуральных значениях, %			Функция отклика	
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2
1	1	0	0	0,400	0,400	0,200	52,000	0,090
2	0	1	0	0,200	0,600	0,200	52,210	0,131
3	0	0	1	0,200	0,400	0,400	45,370	0,098
4	1/2	1/2	0	0,300	0,500	0,200	49,300	0,091
5	1/2	0	1/2	0,300	0,400	0,300	56,430	0,138
6	0	1/2	1/2	0,200	0,500	0,300	56,120	0,155
7	1/3	1/3	1/3	0,270	0,470	0,270	61,000	0,120
8	2/3	1/6	1/6	0,330	0,430	0,230	55,860	0,094
9	1/6	2/3	1/6	0,230	0,530	0,230	58,900	0,121
10	1/6	1/6	2/3	0,230	0,430	0,330	55,400	0,130

После обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, отражающие степень влияния состава композиции на прочность сцепления покрытия с основой и износостойкость:

$$Y_1 = 51,7617X_1 + 52,8099X_2 + 44,989X_3 + 29,7414X_1X_3 + 29,7578 X_2 \times X_3 + 152,3753X_1X_2X_3;$$

$$Y_2 = 0,0877X_1 + 0,1308X_2 + 0,0987X_3 + 0,1741X_1 X_3 + 0,1644X_2 X_3.$$

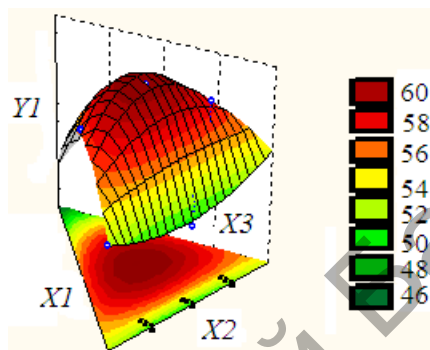
Оптимальные соотношения при напылении композиции № 2 следующие:

$$X_1 = 0,189; \quad X_2 = 0,414; \quad X_3 = 0,397.$$

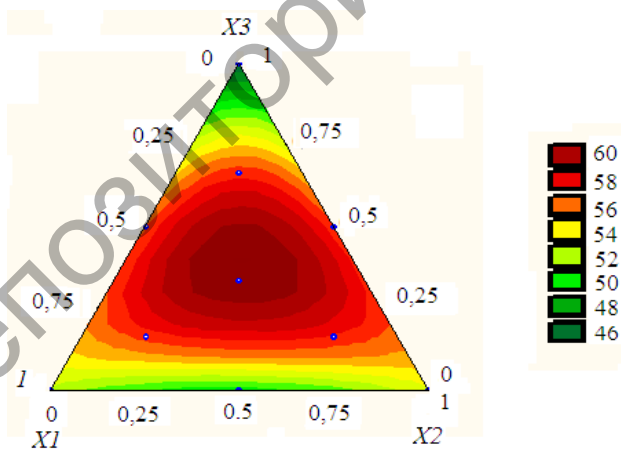
Расчётное значение прочности сцепления при данном соотношении компонентов и при износостойкости U более 0,15 ч / мкм равно 61,37 МПа.

Установлено, что все модели адекватны при 5%-м уровне значимости по критерию Фишера.

Графические изображения уравнений регрессии на плоскости и в объёме для выбранных функций отклика (прочность сцепления и износостойкость), а также графики оптимизации приведены на рисунках 3.8—3.10



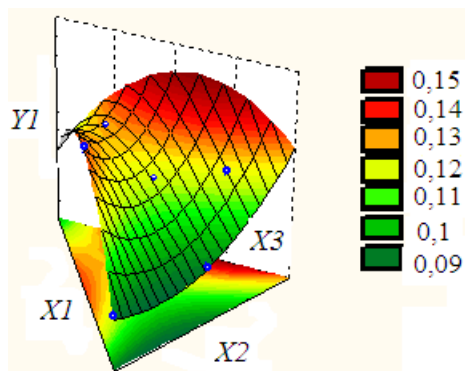
а)



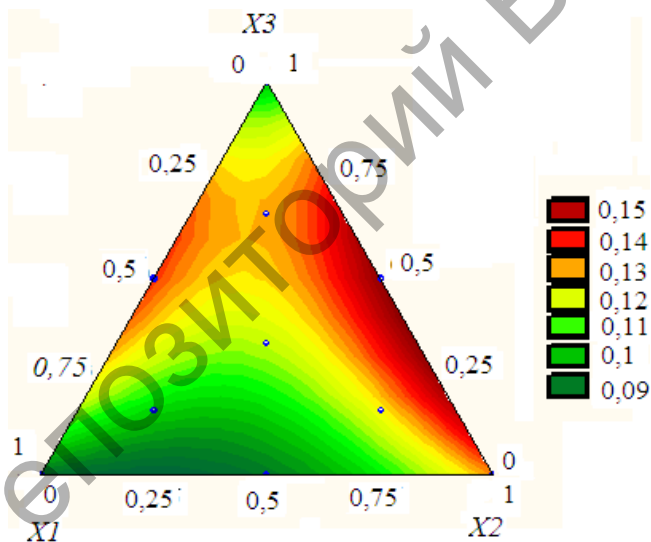
б)

а — поверхность отклика в объёме; б — поверхность отклика на плоскости

Рисунок 3.8 — График зависимости прочности сцепления покрытия с основой от состава композиционного материала № 2



a)



b)

a — поверхность отклика в объеме; *b* — поверхность отклика на плоскости

Рисунок 3.9 — График зависимости износостойкости покрытий от состава композиционного материала № 2

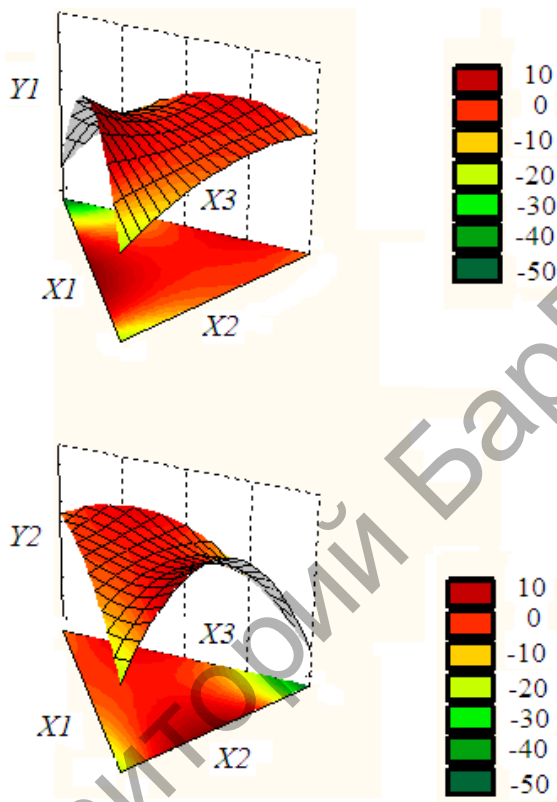


Рисунок 3.10 — Поверхность оптимизации состава композиционного материала № 2 для обеспечения максимальной прочности сцепления и износостойкости

Из анализа полученных математических моделей и графиков влияния состава композиций на свойства покрытий можно сделать вывод, что на прочность сцепления покрытия из композиционного материала № 1 наиболее значительное влияние оказывают компонент на основе меди и термореагирующий компонент, что обусловлено легкоплавкостью первого и экзотермическим эффектом второго. На износостойкость наибольшее влияние

оказывают компоненты на основе меди и железа, а также их взаимное влияние, что обусловлено образованием структуры покрытия с пластичной матрицей, обладающей антифрикционными свойствами, с твёрдыми включениями в виде частиц легированного порошка на основе железа. В составе композиционного материала № 2 присутствуют два термореагирующих компонента, основу одного из которых составляет никель-медная матрица, образующая вместе с компонентом на основе железа структуру покрытия, соответствующую правилу Шарпи. Этим можно объяснить более высокую прочность сцепления покрытия из композиционного материала № 2.

В результате проведённых экспериментальных исследований определены оптимальные составы композиций для упрочнения валов бумагоделательного оборудования: композиция № 1: 30,9% ПТ-НА-01 + 32,7% ПР-Х4Г2Р4С2Ф + 36,4% ПР-НД42СР; композиционный материал № 2: 18,9% ПТ-НА-01 + 41,4% ПГ-19М-01 + 39,7% ПР-Х4Г2Р4С2Ф [152].

3.3 Исследование и оптимизация режимов подготовки поверхности перед напылением

Предварительная обработка поверхности основы — важный фактор для обеспечения прочного сцепления напылённого слоя с материалом основы, необходимым условием является подготовка поверхности основного материала путём удаления загрязнений и активации поверхности основы.

К технологическим приёмам активации относятся: повышение шероховатости поверхности, деформирование поверхности основы для создания напряжённого состояния, предварительный нагрев изделия [153].

Существенное влияние на взаимодействие материалов при газотермическом напылении оказывает шероховатость основы. При подготовке поверхности основы для газотермического напыления необходимо учитывать физико-механические свойства поверхности и условия напыления. Так, при напылении

частиц с низкой скоростью увеличение шероховатости ведёт к росту прочности сцепления их с основой и увеличению коэффициента напыления. Достигнув максимального значения, прочность сцепления начинает уменьшаться.

При напылении высокоскоростных частиц увеличение высоты микронеровностей поверхности основы незначительно влияет на их взаимодействие в зоне контакта.

С увеличением шероховатости наблюдаются следующие закономерности: 1) уменьшается удельная площадь поверхности основы; 2) уменьшается концентрация микровыступов; 3) растёт пластическая деформация вершин микровыступов при напылении; 4) ухудшаются условия взаимодействия во впадинах; 5) при микронеровностях, соизмеримых с размерами напыляемых частиц и больших, роль микровыступов в образовании связи невелика [105].

Наиболее сильно проявляется влияние шероховатостей поверхности основы на образование прочного соединения при небольшой пластической деформации основы.

Таким образом, при подготовке поверхности основы для газотермического напыления в целях получения прочного соединения основы с покрытием, принимая во внимание перечисленные закономерности, необходимо определять метод и режимы подготовки поверхности с учётом условий работы детали, напыляемого материала и материала основы.

Прочность сцепления покрытий достигает максимальных значений при соотношении параметра шероховатости, равного 0,75 мкм, и диаметра частиц напыляемого материала. Наиболее высокая прочность сцепления отмечена при напылении порошком фракции 80...100 мкм [77].

Как было отмечено ранее, наклёп поверхностного слоя основы оказывает большое влияние на адгезию частиц при газотермическом напылении. Наклёп материала связан с увеличением в нём плотности структурных дефектов. Это приводит к повышению внутренней энергии основы и, следовательно, к уменьшению энергии активации реакции взаимодействия, что повышает прочность образующихся связей.

В материалах с небольшой плотностью дислокаций предварительное увеличение пластической деформации приводит к увеличению числа дислокаций и, в конечном счёте, к росту числа активных центров взаимодействия. На этом этапе растёт прочность сцепления покрытия с основой. Но дальнейшее повышение плотности дислокаций может привести к уменьшению числа активных центров, а следовательно, и уменьшению прочности сцепления напылённого покрытия с основой. Это объясняется тем, что движение дислокаций при приложении такого же давления со стороны напыляемой частицы будет тормозиться предварительно созданными дефектами структуры, и в результате этого количество дислокаций, выходящих на контактную поверхность, уменьшится.

Плотность дислокаций в материале основы, влияющая на количество активных центров, зависит от физико-механических свойств материала и условий напыления, прежде всего давления и температуры в контакте, скорости деформации.

Для очистки и активации используют механическое, химическое и термическое воздействие.

Механическое воздействие подразделяется на три вида: обработка поверхности заготовки струей газа (обдув); струёй жидкости; твёрдым материалом, который может быть компактным (резец, ролик) или дискретным (щётки, зёрна абразивного круга, частицы абразива).

Химическое воздействие осуществляют органические и неорганические (кислотные, щелочные, солевые) реагенты.

При термическом воздействии используют нагретый газ (неподвижный и движущийся), ионизированный газ, излучение (инфракрасный, видимый и ультрафиолетовый диапазоны), лазер [153].

Благодаря высокой производительности, простоте аппаратного оформления при достигаемом качестве обработки механические методы подготовки поверхности получили широкое распространение. Наиболее используемые из них (нарезание резьбы, струйно-абразивная обработка, иглофрезерование) связаны с ударным воздействием на материал основы и с образо-

ванием поверхности скола. Во всех случаях целью механического воздействия на основу является создание наклёпа приповерхностных слоёв и определённого рельефа поверхности.

Наиболее производительный и экономичный вид струйно-абразивной обработки поверхности металла — способ дробеструйной обработки [51].

На данный процесс влияет вид абразивного материала, форма, размеры, требования, предъявляемые к свойствам покрытий.

В качестве абразивных материалов для дробеструйной обработки используют стальную и чугунную крошку, корунд, карбид кремния, кварцевый песок.

Стальная крошка должна быть твёрдой (7 500 МПа), остроугольной, свободной от ржавчины.

Наилучшее качество поверхности получается при давлении сжатого воздуха 0,6 МПа.

Другим способом абразивной подготовки поверхности является очистка металлическими щётками, при которой снимается слой 0,5...2,0 мм и обеспечивается высокое качество поверхности с шероховатостью 10...50 мкм [154].

Удаление загрязнений, получение требуемой шероховатости поверхности и её нагрев до 200...300°C достигается погружением заготовки в псевдосжиженный слой абразива [154].

При напылении покрытий необходимо обеспечивать равномерное заполнение углублений. Так, например, напыление порошка на пилообразную резьбу необходимо производить не перпендикулярно оси вала, а под острым углом. Кроме нарезки резьбы, обработку поверхности можно производить насечкой вручную или с помощью пневматического зубила. Одним из способов подготовки поверхности, который не снижает усталостной прочности поверхности, является накатка.

При подготовке к напылению наружных цилиндрических поверхностей незакалённых заготовок из материала, твёрдость которого не превышает 35 HRC, часто применяют косую сетчатую накатку [99]. При такой обработке прочность сцепления напылённого покрытия с основным металлом при испытаниях на сдвиг резко возрастает, достигая 100 МПа.

При выполнении накатки целесообразно применять оправку, обеспечивающую одновременное воздействие на обрабатываемую поверхность двух роликов, расположенных в одной плоскости с двух сторон заготовки. С помощью ролика фрезеруются треугольные зубья с закруглёнными вершинами и впадинами, расположенными под углом 30° к его оси и направленными у одного ролика вправо, у другого — влево. Ролики изготавливают из стали У10А, после термообработки они должны иметь твёрдость 60...62 HRC. Окружная скорость заготовки при накатывании должна быть 3...4 м / мин. Врезание роликов на полную глубину накатки осуществляют за 1...2 оборота заготовки без включения продольной подачи. Накатывание проводят за один проход с продольной подачей 0,5...1,0 мм / об [155].

Наряду с механическими воздействиями при подготовке поверхности основы к напылению используют химические и термические способы.

Химические способы подготовки поверхности позволяют получать необходимую шероховатость и устранять загрязнения поверхности заготовки [155].

Термическая подготовка газовыми разрядами и ионной бомбардировкой проводится в вакууме и позволяет очистить и активировать поверхность заготовки путём нагрева [156].

В соответствии с требованиями к подготовке поверхности (ГОСТ 9.304-87. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия газотермические. Общие требования и методы контроля, ГОСТ 28844-90 Покрытия газотермические упрочняющие и восстанавливающие. Общие требования, ГОСТ 28302-89 Покрытия газотермические защитные из цинка и алюминия металлических конструкций. Общие требования к типовому технологическому процессу) в качестве параметров шероховатости, влияющих на прочность сцепления, были выбраны Ra , Rp , R_{max} . В таблице 3.7 приведены уровни факторов и их кодированные значения, соответствующие полнофакторному эксперименту, а в таблице 3.8 — матрица планирования и результаты эксперимента.

Т а б л и ц а 3.7 — Уровни варьирования компонентов

Уровень	Обозначение в кодированных переменных	Факторы		
		Ra	Rp	$Rmax$
Основной	X_0	40	60	135
Интервал варьирования	X_i	10	20	35
Верхний	$X_{i=+1}$	50	80	100
Нижний	$X_{i=-1}$	30	40	170

Т а б л и ц а 3.8 — Матрица планирования эксперимента и результаты функции отклика

Номер опыта	Матрица планирования в кодированных значениях			Матрица планирования в натуральных значениях, мкм			Функция отклика Y
	X_1	X_2	X_3	Ra	Rp	$Rmax$	
1	2	3	4	5,0	6,0	7,0	8,0
1	2	3	4	5,0	6,0	7,0	8,0
1	—	—	—	30,0	40,0	100,0	44,7
2	+	—	—	50,0	40,0	100,0	45,8
3	—	+	—	30,0	80,0	100,0	39,8
4	+	+	—	50,0	80,0	100,0	43,2
5	—	—	+	30,0	40,0	170,0	49,5
6	+	—	+	50,0	40,0	170,0	49,2
7	—	+	+	30,0	80,0	170,0	55,5
8	+	+	+	50,0	80,0	170,0	49,0

Примечание. Y — прочность сцепления, МПа.

С учётом значимости коэффициентов регрессии с 95%-й вероятностью по критерию Стьюдента математическая модель имеет вид

$$Y = 14,94463X_1 + 0,8497X_2 + 0,15046X_3 - 0,14589X_3 + 0,00921X_1X_2 - 0,0016 X_1X_3 - 0,00053X_2X_3.$$

Установлено, что модель адекватна при 5%-м уровне значимости по критерию Фишера.

Оптимальные параметры шероховатости определялись при помощи пакета MathCAD при поиске максимального значения функции Y в зависимости от переменных X_1 ; X_2 ; X_3 , в результате расчётов максимального значения (79,477 МПа) функция отклика достигает при $X_1 = 40$; $X_2 = 80$; $X_3 = 100$ (рис. 3.11).

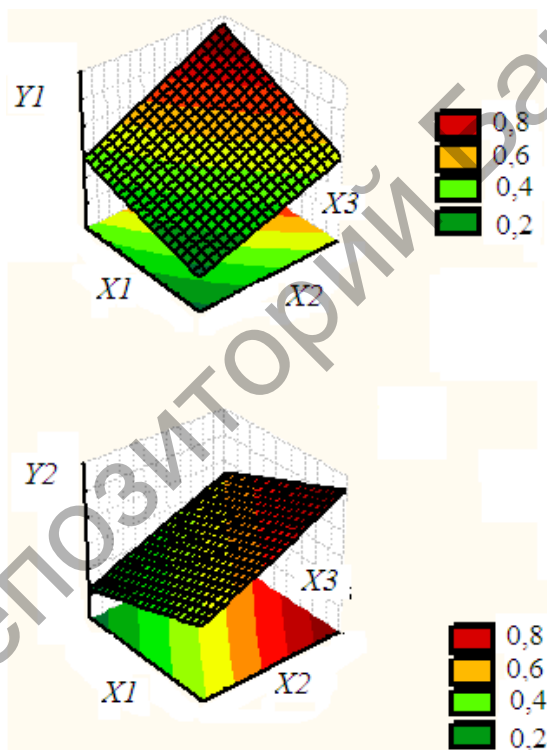


Рисунок 3.11 — График зависимости прочности сцепления от параметров шероховатости

Для определения режимов резания, обеспечивающих данные параметры шероховатости, необходимо совместно решить уравнения:

$$Ra = 0,01 \frac{S^{0,65} (90 + \gamma)^{1,9}}{V^{0,5} R_{в,р}^{0,6}} \text{ мкм}; \quad Rp = 0,01 \frac{S^{0,65} (90 + \gamma)}{V^{0,5} R_{в,р}^{0,25}} \text{ мкм};$$

$$R_{\max} = 0,04 \frac{S^{0,5} (90 + \gamma)}{V^{0,5} R_{в,р}^{0,4}} \text{ мкм},$$

где S — подача, мм / об;

V — скорость резания, м / мин;

$R_{в,р}$ — радиус при вершине резца, мм;

γ — передний угол, рад [148; 149].

Параметры шероховатости исходной поверхности, обуславливающие максимальную прочность сцепления покрытия с основой (сталь 45), обеспечиваются следующими режимами обработки и геометрией режущего инструмента со вставкой из гексанида: скорость резания, равная 6...8 м / мин, при диаметре напыляемой поверхности 50 мм, подача — 0,75 мм / об, радиус при вершине резца — 0,1...0,2 мм, глубина резания — 0,4...0,7 мм, главный и вспомогательный углы — 40°; 20°; -5° соответственно.

Пример. Расчёт режимов резания при помощи пакета программ MathCAD.

Исходные данные:

Диаметр напыляемой заготовки, D , мм:	50;
Параметры шероховатости, R , мкм:	
Ra	40;
Rp	80;
R_{\max}	100.

Блок решения:

Given

Уравнения:

$$0,01 \frac{S^{0,65} \left(\frac{\pi}{2} + \gamma \right)^{0,19}}{V^{0,5} R_{в,р}^{0,6}} = 50;$$

$$0,01 \frac{S^{0,65} \left(\frac{\pi}{2} + \gamma \right)}{V^{0,5} Rv^{0,25}} = 80;$$

$$0,04 \frac{S^{0,5} \left(\frac{\pi}{2} + \gamma \right)}{V^{0,5} Rv^{0,4}} = 100.$$

Ограничительные условия:

$$5 < V < 20; \quad 0,5 < S < 0,75; \quad 0,3 < Rv < 1; \quad 0 < \gamma < 0,0877.$$

Переменные, которые надо найти:

V — скорость резания, м / мин;

S — подача, мм/об;

Rv ($R_{в.р}$) — радиус при вершине резца, мм;

γ — передний угол, рад

$F := \text{Miner}(V, S, Rv, \gamma)$ — возвращает значение одной или ряда переменных для приближённого решения.

Решение:

$$F := \begin{pmatrix} 5 \\ 0,75 \\ 0,153 \\ 0,088 \end{pmatrix} \quad V_r := 5, \quad \gamma_p := 0,088$$

$$n = 1000 \frac{V_r}{\pi D}, \quad \text{— частота вращения, об / мин;}$$

$$n = 31,831$$

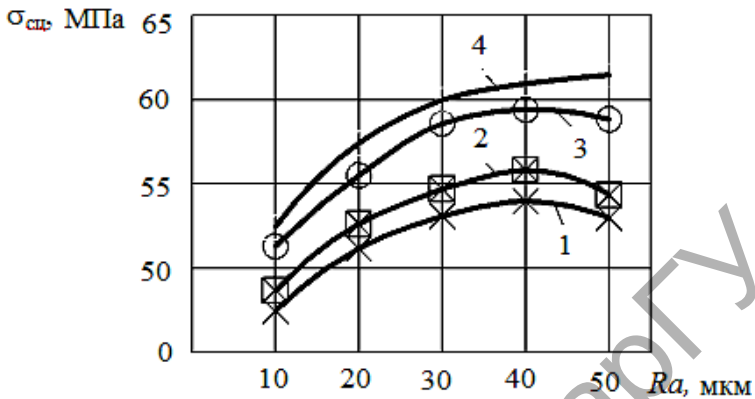
$$\gamma_r = \gamma_p \frac{180}{\pi}, \quad \gamma_r = 5,042 \quad \text{— передний угол в градусах;}$$

$$n_{ст} = 45$$

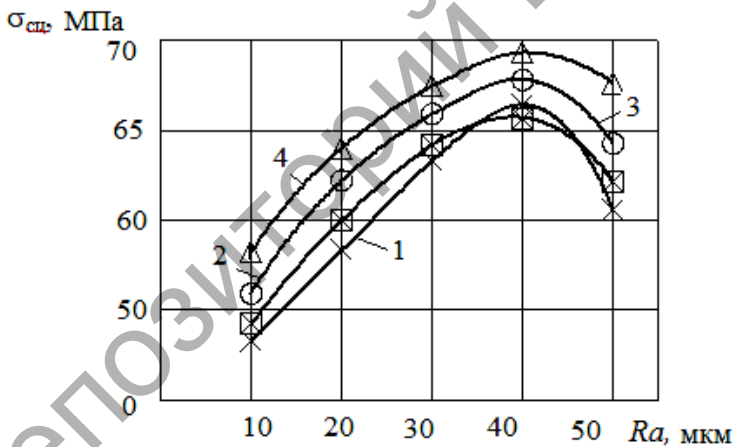
— частота вращения по паспорту станка;

$$V_{пр} = \frac{\pi D n_{ст}}{1000}, \quad V_{пр} = 7,069 \quad \text{— принятая скорость резания.}$$

Результаты испытания прочности сцепления в зависимости от шероховатости поверхности и вида обработки приведены на рисунке 3.12. Анализируя результаты экспериментальных исследований, следует отметить, что, шероховатость поверхности существенно влияет на прочность сцепления [6; 153; 157].



a)



б)

a — без смещения вершины реза; *б* — смещение вершины реза на 3,5 мм

1 — композиция № 1; 2 — композиция № 2 — напыление до оптимизации на рекомендованных режимах ($S = 1$ об / мин; $V = 9,42$ м / мин); 3 — композиция № 1; 4 — композиция № 2 — напыление после оптимизации на рассчитанных режимах ($S = 0,75$ об / мин; $V = 7,07$ м / мин)

Рисунок 3.12 — Зависимость прочности сцепления покрытия с основой от шероховатости поверхности при газопламенном напылении

Максимальная прочность сцепления для всех композиций обеспечивается при параметре шероховатости 35...45 мкм. На прочность сцепления влияет также способ обеспечения оптимальной шероховатости. При той же шероховатости прочность сцепления больше у образцов, подвергнутых лезвийной обработке при смещении вершины резца относительно оси центров. Очевидно, при обработке кроме шероховатости на прочность сцепления оказывает влияние повышение общепотенциальной энергии поверхности (наклёп), обеспечиваемое вибрацией резца при смещении его вершины. Кроме того, полученные экспериментальные результаты подтверждают правильность проведённой оптимизации параметров шероховатости поверхности на основе полученной математической модели, а также свидетельствуют о том, что рассчитанные режимы резания обеспечивают данные параметры [153].

На прочность сцепления оказывает большое влияние и состав композиций. Например, алюминиды, повышают температуру частиц при напылении за счёт экзотермической реакции, а следовательно, прочность сцепления увеличивается [153].

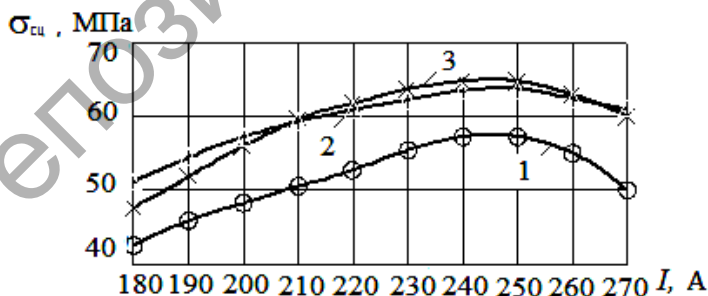
3.4 Исследование и оптимизация технологических параметров плазменного напыления подслоя

Подготовить заготовку к нанесению защитного покрытия можно за счёт предварительного напыления молибдена или композиции «никель—алюминий». В результате этого получают тонкий подслоя с шероховатой поверхностью, на которую напыляют материал с необходимыми эксплуатационными свойствами. Подслоя указанного состава повышают прочность сцепления защитных покрытий с основой и имеют обычно толщину около 0,05...0,13 мм [158].

С увеличением мощности дуги интенсивно возрастают температура и энтальпия плазменной струи как на срезе сопла, так и в других её сечениях. Мощность дуги определяется напряже-

нием и силой тока. Напряжение зависит от длины дуги, что в свою очередь определяется конструкцией распылителя, видом и расходом плазмообразующего газа. При реализации заданной мощности дуги необходимо выбирать режим работы с максимальным напряжением. Сила тока дуги существенно влияет на процесс плазменного напыления. Увеличение силы тока дуги увеличивает её электрическую и эффективную мощность, позволяет напылять порошки крупной грануляции и обеспечивает хорошее прогревание напыляемого материала, что увеличивает прочность сцепления частиц с основой и уменьшает пористость. Однако чрезмерное увеличение силы тока приводит к окислению напыляемых материалов, повышенному износу сопла и катода, выгоранию мелких частиц напыляемого порошка и некоторых легирующих элементов. После проведённых исследований было установлено, что оптимальные значения силы тока составляют 240...250 А, а эффективная мощность дуги, которая получается при напряжении 80...85 В, — 19...22 кВт. Зависимости прочности сцепления покрытия с основой от силы тока дуги представлены на рисунке 3.13.

Расход плазмообразующего газа имеет большое значение при напылении. При его расходе выше оптимальных значений существенно снижается плотность покрытий, уменьшаются коэффициент



1 — сила тока U , равная 70 В; 2 — равная 80 В; 3 — равная 85 В

Рисунок 3.13 — Зависимость прочности сцепления подслоя ПТ-НА-01 от силы тока U

использования порошка и другие показатели эффективности напыления. С увеличением расхода плазмообразующего газа повышается распыляющая способность плазменной струи, её скорость и, соответственно, скорость напыляемых частиц, температура которых снижается. При плазменном напылении объёмный расход плазмообразующего газа составляет 2,0...4,0 м³/ч, массовый — 1,8...7,2 кг/ч [158].

Большое влияние на теплофизические характеристики плазменной струи в условиях теплообмена порошкового напыления оказывает вид газа. Несмотря на высокую температуру, аргонная струя слабо разогревает порошковые частицы. Это обусловлено малой величиной критерия Био и укороченной высокотемпературной зоной плазменной струи. Большая степень прогрева напыляемых частиц достигается при использовании азота и водородосодержащих газов. При добавлении водорода к аргону, азоту можно получить плазменную струю, в которой интенсифицируется теплообмен между порошком и плазмой. Кроме того, зона нагрева водородосодержащих струй является достаточно протяжённой. Увеличивается время нагрева напыляемых частиц и, соответственно, их энтальпия. Однако существенным недостатком водорода как плазмообразующего газа является его взрывоопасность.

Расход газа на подачу порошка составляет около 10% расхода плазмообразующего газа. Возрастание расхода транспортирующего газа облегчает и стабилизирует подачу порошка. Вместе с тем наблюдается смещение потока частиц относительно плазменной струи. При этом резко снижается температура, уменьшаются скорость движения частиц и коэффициент использования порошкового материала.

Скорость подачи порошка, составляющую 0,9...7,2 кг/ч, обычно оценивают по его расходу. Повышенное количество порошка, подаваемого в плазменную струю, приводит к снижению её температуры. При этом снижается эффективность процесса. Для подачи порошка используют газы, аналогичные плазмообразующим, а также и другие газы с различными физико-химическими свойствами [158; 159].

Характерной особенностью является замедление возрастания пористости с увеличением расхода порошка на том же участке, где наблюдается максимум прочности сцепления, а также резкое увеличение пористости и снижение прочности сцепления при относительно незначительном повышении расхода порошка (рис. 3.14).

Процесс локального повышения прочности сцепления может быть объяснён следующим образом. С увеличением расхода порошка (при неизменной тепловой мощности плазменной струи) температура напыляемых частиц снижается, а их концентрация в потоке увеличивается. При нанесении покрытия частицы могут попадать на свободные участки поверхности, нагретые уже напылёнными частицами. Это наиболее вероятно при повышении концентрации частиц в потоке. Начиная с некоторого значения расхода порошка (2,5 кг / ч), фактор увеличения концентрации оказывает большее влияние на прочность сцепления покрытия, чем фактор снижения температуры напыляемых частиц. В силу этого наблюдается локальное повышение температуры поверхности основы при образовании первого слоя покрытия, что приводит к снижению температуры частиц и, соответственно, к уменьшению прочности сцепления.

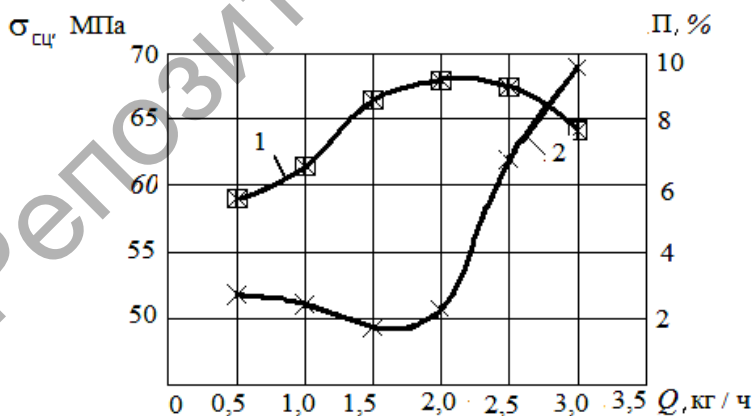
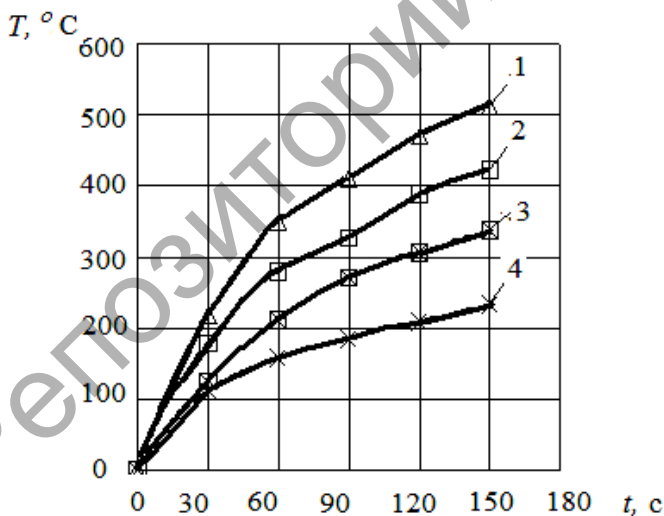


Рисунок 3.14 — Зависимость прочности сцепления подслоя из порошка ПТ-НА-01 (1) и его пористости (2) от величины расхода порошка

В результате проведённых экспериментальных исследований установлено, что оптимальный расход порошка ПТ-НА-01 может достигать 2,5 кг / ч при коэффициенте использования 83...86% [158].

Существенное влияние на нагрев основы оказывают время напыления и расход порошка, определяющий количество нагретых частиц, которые поступают на напыляемую поверхность за единицу времени (рис. 3.15).

Как было отмечено выше, температура напыляемой поверхности является важным параметром, во многом определяющим свойства покрытия. Её измерение в процессе напыления на реальную заготовку очень сложно. Для определения температуры нагрева напыляемой поверхности были изготовлены образцы в виде дисков диаметром 120 мм и толщиной 20 мм. Измерение температуры осуществлялось пирометром Raynger MX4.



1 — производительность G , равная 4 кг / ч; 2 — равная 6 кг / ч;
3 — равная 8 кг / ч; 4 — равная 10 кг / ч

Рисунок 3.15 — Зависимость температуры поверхности основы от времени напыления при производительности G плазматрона ПП-25

В исследуемом диапазоне производительности плазменного напыления (4...10 кг/ч), наличие порошка в струе всегда приводит к повышению температуры поверхности основы по сравнению с чистой плазменной струей. При повышении производительности возрастает скорость повышения температуры поверхности основы, но по мере увеличения толщины слоя покрытия она снижается. Отсюда очевидно, что температура поверхности основы сильно зависит от производительности и времени напыления заданного слоя покрытия.

Для подслоя толщина обычно составляет 0,1...0,2 мм. Данную толщину можно нанести за один или несколько проходов. Интенсивность нагрева основы при этом будет различной. При напылении за несколько проходов поверхность образцов нагревается меньше, так как после каждого прохода образцы охлаждаются в результате теплообмена с окружающей средой и отвода теплоты с поверхности в основу.

При напылении крупногабаритных деталей теплоотвод будет происходить более интенсивно. Однако при напылении основной части газотермического покрытия время воздействия плазменной струи на обрабатываемую поверхность значительно увеличится, следовательно, увеличится и нагрев детали до высоких температур, способствующих перегреву напыляемой детали, что приведёт к возникновению высоких остаточных напряжений, которые недопустимы для крупногабаритных тяжелонагруженных деталей. Поэтому было исследовано влияние температуры основы на прочность сцепления покрытия (рис. 3.16).

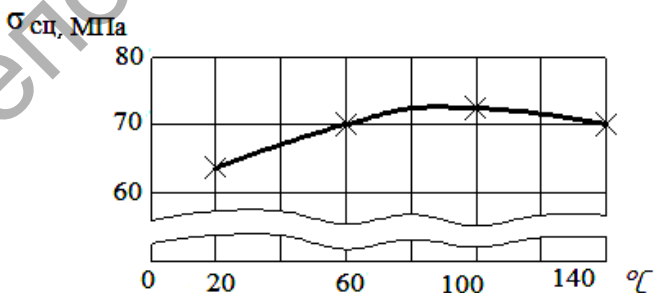


Рисунок 3.16 — Зависимость прочности сцепления покрытия ПТ-НА-01 с основой от температуры её подогрева

С увеличением температуры предварительного подогрева основы прочность сцепления сначала возрастает, а затем уменьшается. При этом максимальные значения прочности сцепления соответствуют тем интервалам температуры подогрева основы, где наблюдается оптимальное растекание частиц порошка (см. рис. 3.16). При нагреве основы свыше 100°C начинается интенсивное образование оксидов, которые уменьшают межатомные силы взаимодействия между основой и напыляемым материалом, что негативно сказывается на прочности сцепления покрытия. Кроме того, перегрев детали может привести к увеличению остаточных напряжений как в самой детали, так и на её поверхности, снижая тем самым сопротивляемость усталостным процессам и прочность сцепления покрытия с основой.

Повышение температуры предварительного подогрева основы способствует, с одной стороны, увеличению времени кристаллизации частиц порошка при растекании, в результате чего пористость покрытия снижается, с другой — повышению степени окисления поверхности основы, что приводит к снижению прочности сцепления напылённого покрытия с основой.

Проведённые исследования позволили предположить, что для получения подслоя и покрытия с оптимальными свойствами необходимо начинать процесс напыления подслоя после предварительного подогрева основы до температуры $100\dots 200^{\circ}\text{C}$, а основной части ГТП практически сразу после плазменного напыления за счёт применения установки газопламенного напыления, что позволяет сократить время вследствие отсутствия необходимости переналадки плазменной установки, кроме того, применение газопламенного напыления не приведёт к катастрофическому перегреву напыляемой детали [158].

Известно, что дистанция напыления является фактором, сильно влияющим на качество покрытия. В связи с этим в работе представлена серия экспериментов для определения оптимальной дистанции напыления, при проведении которых установлена зависимость прочности сцепления от дистанции напыления для порошков с различными диаметрами частиц (рис. 3.17).

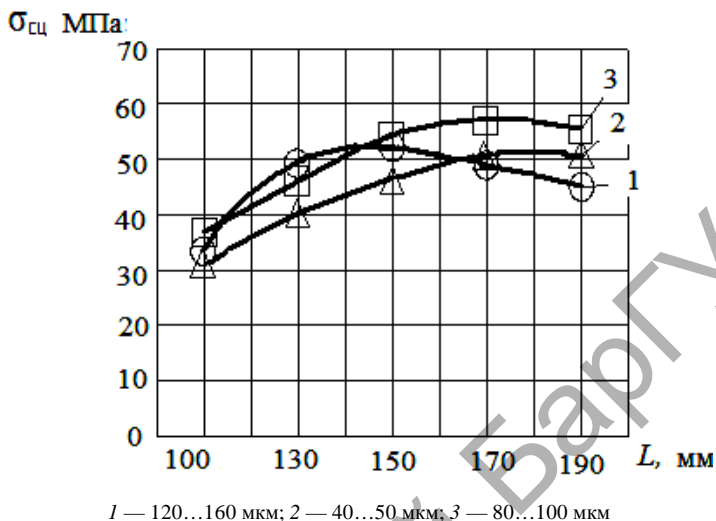


Рисунок 3.17 — Зависимость прочности сцепления плазменного покрытия из ПТ-НА-01 от дистанции напыления и фракции порошка

В результате исследования влияния дистанции плазменного напыления на прочность сцепления подслоя из терморегулирующего материала ПТ-НА-01 был определен оптимальный диапазон дистанции напыления (160...180 мм), обеспечивающий максимальную прочность сцепления покрытия с основой. Чрезмерно малые дистанции напыления, близкие к длине начального участка плазменной струи, не всегда обеспечивают прогрев порошковых частиц и необходимую скорость их движения. Вместе с тем возрастает опасность недопустимого нагрева изделия. С увеличением дистанции резко снижаются температура, скорость плазменной струи на основном участке. Наблюдается снижение температуры и скорости напыляемых частиц. Наибольшие дистанции напыления выбирают при использовании ламинарной плазмы или при протекании процесса в низком вакууме. Существенно возрастает дистанция напыления с увеличением мощности дуги при использовании газов с высокой энтальпией. В процессе нанесения покрытия отмечена интенсивная инжекция воздуха в струю плазменной горелки.

Основными параметрами, определяющими степень «растекания» напыляемых частиц по поверхности детали, являются их скорость и температура.

Для того чтобы достичь максимального эффекта от напыления подслоя, необходимо выполнение условия протекания экзотермической реакции в момент соударения частиц порошка и основы либо после их соударения. На этот фактор оказывают влияние технологические режимы напыления, поэтому было исследовано влияние дистанции напыления, размера частиц порошка, шероховатость напыляемой поверхности (рис. 3.18).

Из зависимости (см. рис. 3.18) видно, что максимальная прочность сцепления покрытия с основой достигается при значении параметра шероховатости Ra , равном 40...50 мкм, кроме того, это подтверждает и правильность проведённой ранее оптимизации параметров шероховатости.

Для плазменного напыления подслоя были получены следующие технологические параметры: сила тока дуги — 240...250 А; напряжение — 80...85 В; дистанция напыления 170...180 мм; расход плазмообразующего газа — 3,0...3,5 м³/ч; расход порошка — 1,5...2,5 кг/ч [158].

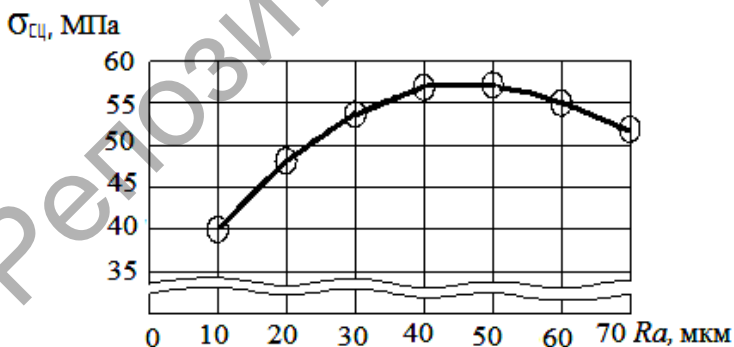


Рисунок 3.18 — Зависимость прочности сцепления плазменного покрытия из ПТ-НА-01 от шероховатости поверхности

3.5 Исследование и оптимизация технологических параметров газопламенного напыления основного слоя

Как видно из рисунка 3.19, дистанция напыления оказывает влияние на прочность сцепления покрытия. Полученные зависимости свидетельствуют о том, что максимальной температуры частицы достигают на расстоянии 200 мм от сопла, а затем идёт снижение температуры. Частицы меньшей грануляции (≈ 50 мкм) нагреваются более интенсивно и достигают температуры плавления на расстоянии около 120 мм от сопла горелки, а снижение их температуры по мере удаления от сопла происходит более интенсивно. После дистанции 150 мм идёт плавное увеличение прочности сцепления, а после дистанции напыления 200 мм наблюдается резкий спад кривых. Такое изменение прочности сцепления в зависимости от дистанции напыления объясняется высокой скоростью полёта частиц (до 100 м/с), высокой скоростью их нагрева (около 10^6 град/с) и временем контакта порядка $(3...5) \cdot 10^{-3}$ с.

На прочность сцепления влияет и состав композиций. Прочность сцепления у композиций, содержащих больше по объёму терморреагирующего порошка, выше (композиция № 1). Наличие

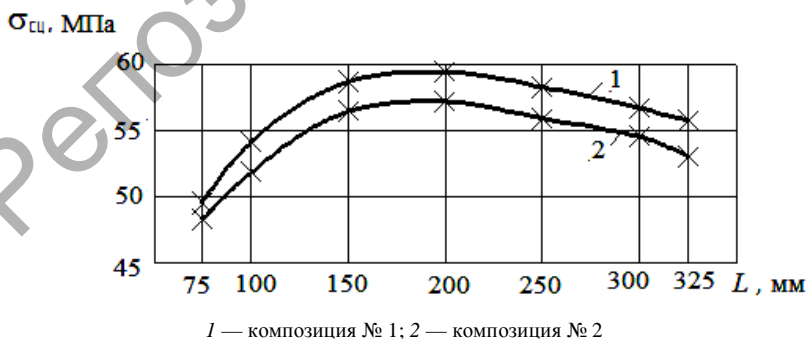


Рисунок 3.19 — Зависимость прочности сцепления покрытия от дистанции напыления

компонента «алюминий—никель» за счёт экзотермической реакции приводит к перегреву частиц и, следовательно, к повышению прочности сцепления.

Напылённое покрытие формируется путём последовательной укладки большого числа нагретых до температуры плавления частиц, сопровождающейся их деформацией. При последовательной укладке слоёв неизбежно образуются пустоты (особенно на стенках частиц). Эти пустоты, или поры, оказывают решающее влияние на физико-механические свойства покрытий, и оценка их количества необходима при выборе рациональных режимов нанесения покрытий в каждом конкретном случае.

Пористость зависит от технологических параметров процесса напыления, расхода и давления рабочих газов, состава газовой смеси, количества подаваемого в единицу времени порошкового материала в зону горения, дистанции напыления и др. Основное влияние на пористость покрытий оказывает дистанция напыления и напыляемый материал (рис. 3.20).

Как видно из зависимости, минимальная пористость достигается при дистанции напыления 140...200 мм. Это, как и прочность сцепления, объясняется наибольшей температурой нагрева частиц при этой дистанции. На пористость покрытия оказывает

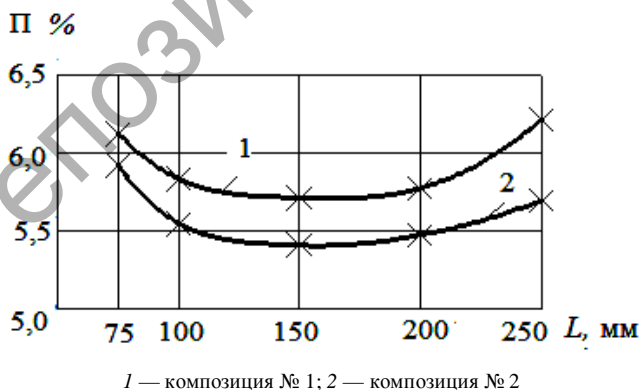


Рисунок 3.20 — Зависимость пористости покрытия из композиционных материалов от дистанции напыления

влияние состав композиции. Наименьшая пористость (5...6%) наблюдается у композиции, содержащей большее количество (по объёму) медьсодержащего компонента (ПГ-19М-01). При формировании покрытия частицы из этих компонентов в большей степени пластически деформируются, залечивая поры [157].

Кроме того, на качество покрытия оказывают влияние и такие параметры напыления, как расходы горючего и транспортирующего газа, а также распыляемого материала. Поэтому для расчёта оптимального соотношения параметров напыления был реализован полный факторный эксперимент 2^3 . Переменными факторами являются: расход горючего газа МАФ (X_1), расход кислорода (X_2), расход транспортирующего газа (воздух) (X_3). Основной уровень и интервал варьирования установлены, исходя из результатов исследований, на основе априорной, экспериментальной информации и литературных данных [48; 51—53; 77; 111; 120; 121]. В соответствии с планом было выполнено восемь опытов, рандомизированных во времени. Количество повторений опытов — три.

Параметром оптимизации, а соответственно, и функцией отклика, являлась прочность сцепления (Y). В таблице 3.9 приведены уровни факторов и интервалы варьирования, выбранные при расчёте оптимальных соотношений параметров напыления, в таблице 3.10 — матрица планирования и результаты эксперимента.

Реализация матрицы планирования позволила получить адекватную математическую модель, которая с учётом статистической значимости коэффициентов регрессии принимает вид:

$$Y = 11,3737 + 6,2746X_1 + 6,2875X_2 - 79,5464X_3 + 4,3036X_1X_2 - 19,15X_1X_3 - 8,0357X_2X_3.$$

На основании полученной модели были определены оптимальные параметры в кодированных значениях, обеспечивающие прочность сцепления покрытия с основой 66,8 МПа (расчётное значение): $X_1 = 1,3$; $X_2 = 4,5$; $X_3 = 0,17$ (рис. 3.21).

Т а б л и ц а 3.9 — Уровни варьирования компонентов

Уровень	Обозначение в кодированных переменных	Факторы		
		$Q_{\text{МАФ}}$, м ³ /ч	Q_{O_2} , м ³ /ч	$Q_{\text{возд}}$, м ³ /ч
Основной	X_0	1,50	4,30	0,15
Интервал варьирования	X_i	0,50	0,70	0,05
Верхний	$X_i = + 1$	2,00	5,00	0,20
Нижний	$X_i = - 1$	1,00	3,60	0,10

Т а б л и ц а 3.10 — Матрица планирования эксперимента и функция отклика

Номер опыта	Матрица планирования в кодированных значениях			Матрица планирования в натуральных значениях, м ³ /ч			Функция отклика Y
	X_1	X_2	X_3	$Q_{\text{МАФ}}$	Q_{O_2}	$Q_{\text{возд}}$	
1	—	—	—	1,0	3,6	0,2	44,7
2	+	—	—	2,0	3,6	0,2	45,8
3	—	+	—	1,0	5,0	0,2	39,8
4	+	+	—	2,0	5,0	0,2	43,2
5	—	—	+	1,0	3,6	0,3	49,5
6	+	—	+	2,0	3,6	0,3	49,2
7	—	+	+	1,0	5,0	0,3	55,5
8	+	+	+	2,0	5,0	0,3	49,0

Оптимальные параметры газопламенного напыления: дистанция напыления — 180 мм, расход МАФ — 1,0...1,2 м³/ч, расход кислорода — 4,0...4,5 м³/ч, расход воздуха — 0,2 м³/ч, расход порошка — 2...3 кг/ч.

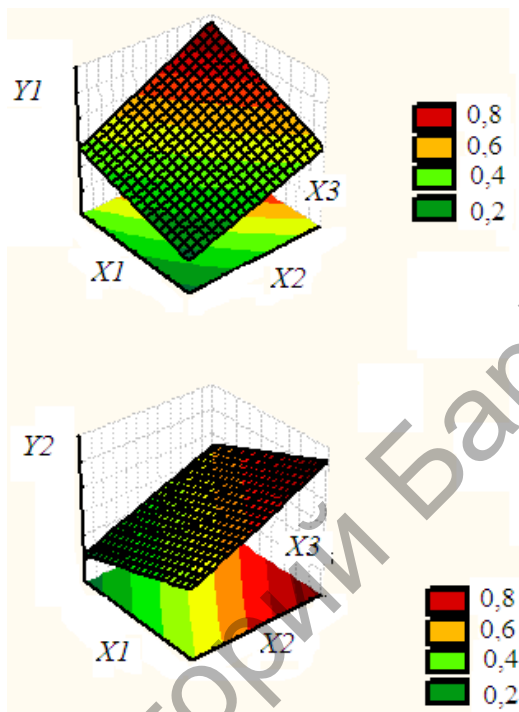
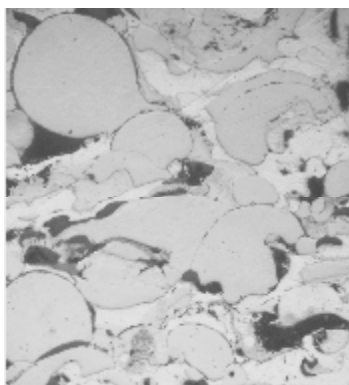


Рисунок 3.21 — График зависимости прочности сцепления от параметров напыления

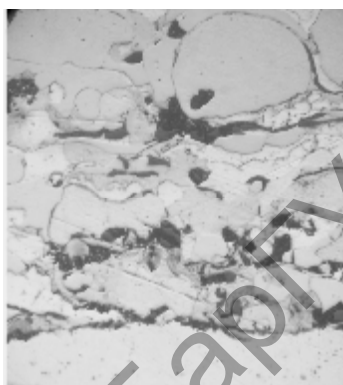
3.6 Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий

Результаты исследования структуры покрытий представлены на рисунках 3.22—3.25.

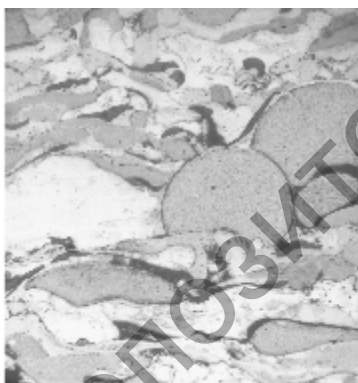
Структура покрытий после напыления характеризуется значительной неоднородностью как внутри отдельных частиц, так и по покрытию в целом. Такая картина наблюдается при различных режимах напыления и вне зависимости от состава композиции. Неравномерность структуры покрытий обусловлена двумя факторами: во-первых, неоднородностью исходных частиц,



a)



б)



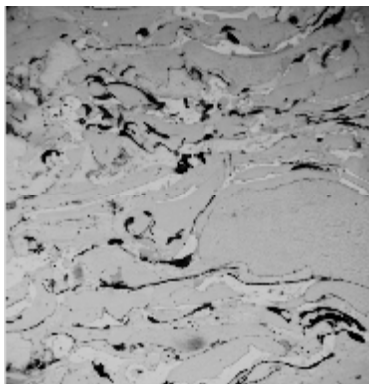
в)



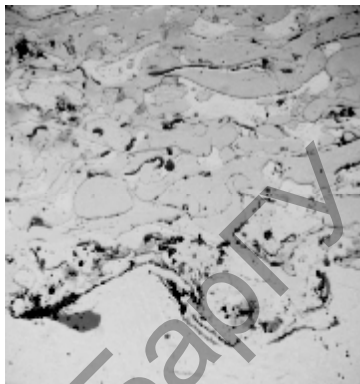
з)

a — нетравленое покрытие $\times 200$; *б* — нетравленое покрытие с основой $\times 200$;
в — травленое покрытие $\times 200$; *з* — травленое покрытие с основой $\times 200$

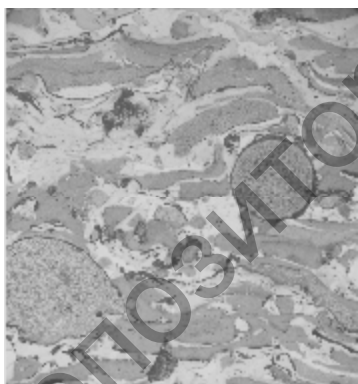
Рисунок 3.22 — Структура покрытия из композиции № 1



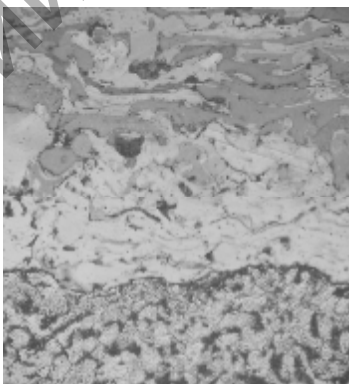
a)



б)



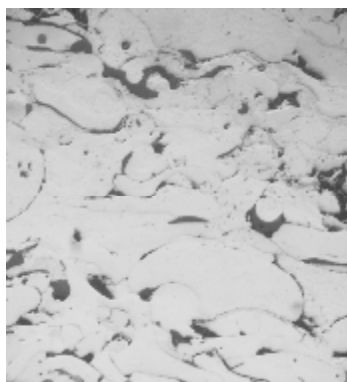
в)



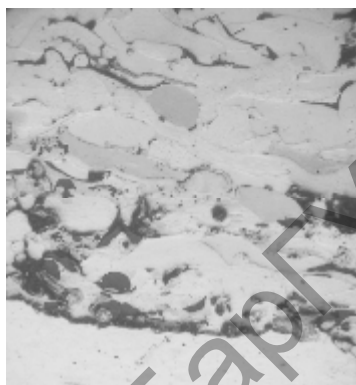
г)

a — нетравленое покрытие $\times 200$; *б* — нетравленое покрытие с основой $\times 200$;
в — травленое покрытие $\times 200$; *г* — травленое покрытие с основой $\times 200$

Рисунок 3.23 — Структура покрытия из композиции № 1, напылённого на оптимальных режимах



a)



б)



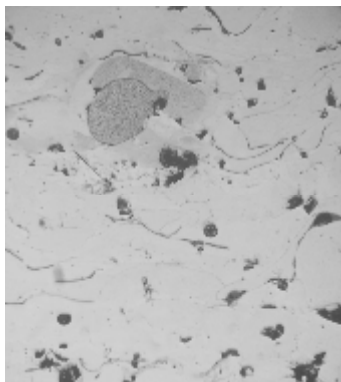
в)



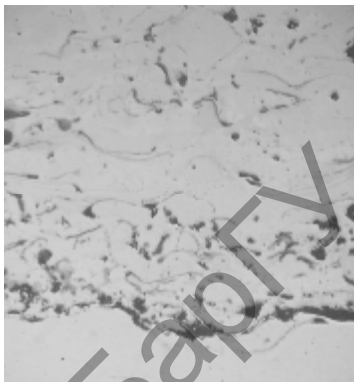
з)

a — нетравленое покрытие x 200; *б* — нетравленое покрытие с основой x 200;
в — травленое покрытие x 200; *з* — травленое покрытие с основой x 200

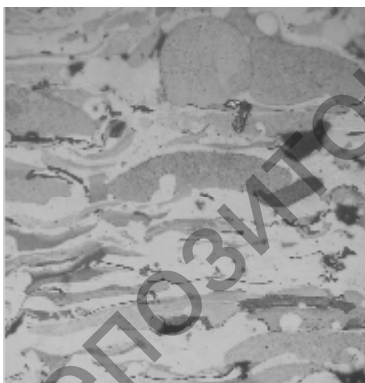
Рисунок 3.24 — Структура покрытия из композиции № 2



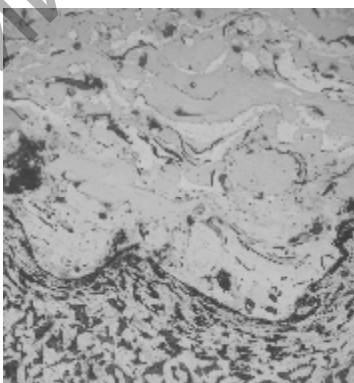
a)



б)



в)



г)

a — нетравленое покрытие x 200; *б* — нетравленое покрытие с основой x 200;
в — травленое покрытие x 200; *г* — травленое покрытие с основой x 200

Рисунок 3.25 — Структура покрытия из композиции № 2, напылённого на оптимальных режимах

гомогенизация которых в процессе напыления находится в начальной стадии; во-вторых, разными условиями их застывания. Интенсивность теплоотвода зависит от пористости: частицы, окружённые порами, остывают медленнее, а пористость покрытия неравномерна.

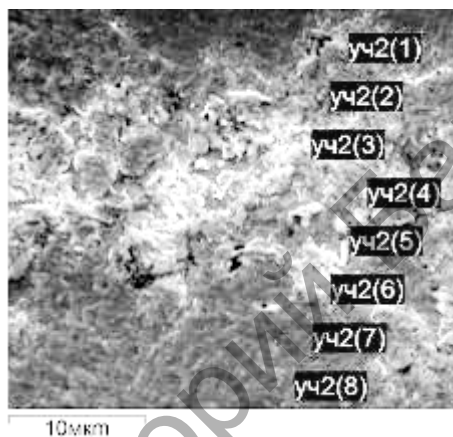
Медь, по-видимому, преимущественно растворяется в металлической фазе покрытия, однако отдельные её включения заполняют поры между частицами. Покрытия из порошка, имеющего в своем составе медь, характеризуются несколько более равномерной структурой, меньшей пористостью и меньшим количеством частиц, сохранивших двухфазность строения [157; 159].

По-видимому, наличие на поверхности частиц легкоплавкой меди и её более поздняя кристаллизация, а также наличие терморреагирующих компонентов в композициях при напылении выделяющих дополнительное тепло, способствуют некоторому увеличению времени интенсивного протекания химического взаимодействия и диффузионных процессов [152].

Протекание химического взаимодействия и образование диффузионной зоны между покрытием и основой подтвердил проведённый количественный анализ.

Применяли два типа исследований: спектр с поверхности шлифа; структура поверхности в сочетании с Y -модуляцией, т. е. медленное сканирование электронного пучка вдоль линии с регистрацией рентгеновского излучения по каждому элементу с и построением концентрационных кривых распределения. Кроме того, проводился точечный микрорентгеноспектральный анализ по программе количественного анализа. Для исследования распределения элементов по поверхности применяли также съёмку в характеристическом рентгеновском излучении по программе Smart map, имеющей два режима. В первом случае на экране цветного дисплея получали картину распределения одного из элементов. Цвет на фотографии определяет концентрацию: черный — полное отсутствие элемента, белый — 100%-е присутствие, переходные цвета говорят о промежуточной концентрации. Во втором случае получаем распределение трёх и более элементов одновременно, при этом каждому из элементов присваивается условный цвет. Все остальные цвета

образуются при наложении трёх основных и говорят о совместном присутствии элементов на том или ином участке образца, а концентрация в этом случае определяется плотностью цвета. Применение этой программы исследований облегчает понимание механизмов диффузионных процессов. Результаты микрорентгеноспектрального анализа представлены на рисунках 3.26 и 3.27.



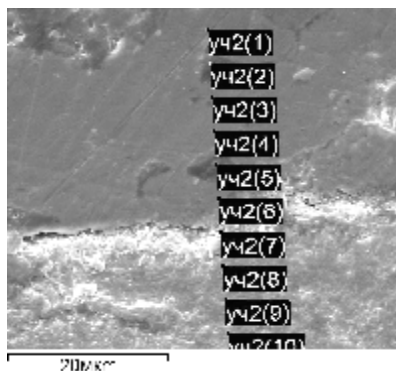
a)

Спектр	Al	Si	Cr	Fe	Ni	Cu
yч2(1)	7,10	0,00	0,63	2,84	2,89	86,54
yч2(2)	4,68	0,00	0,51	3,12	3,77	87,92
yч2(3)	82,05	0,00	0,00	0,00	16,54	1,40
yч2(4)	0,00	0,00	0,00	0,36	99,64	0,00
yч2(5)	22,28	0,00	0,00	0,50	77,22	0,00
yч2(6)	16,58	0,66	2,43	3,86	76,48	0,00
yч2(7)	0,00	0,00	0,00	99,28	0,00	0,72
yч2(8)	0,00	0,43	0,00	99,57	0,00	0,00
yч2(9)	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00

б)

a — микроструктура покрытий; *б* — распределение легирующих элементов

Рисунок 3.26 — Композиция № 1



а)

Спектр	Al	Si	Cr	Fe	Ni	Cu
уч 2(1)	6,15	0,00	1,16	0,57	92,12	0,00
уч2(2)	40,99	0,00	1,69	2,26	55,05	0,00
уч2(3)	1,74	0,00	0,86	2,34	95,07	0,00
уч2(4)	0,58	0,00	0,78	2,24	96,40	0,00
уч2(5)	45,40	0,00	0,47	2,39	51,75	0,00
уч2(6)	3,03	0,00	0,00	4,15	92,82	0,00
уч2(7)	0,00	0,35	0,00	90,55	9,10	0,00
уч2(8)	0,00	0,00	0,00	99,02	0,98	0,00
уч2(9)	0,00	0,00	0,00	99,06	0,94	0,00
уч2(10)	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00

б)

а — микроструктура покрытий; б — распределение легирующих элементов

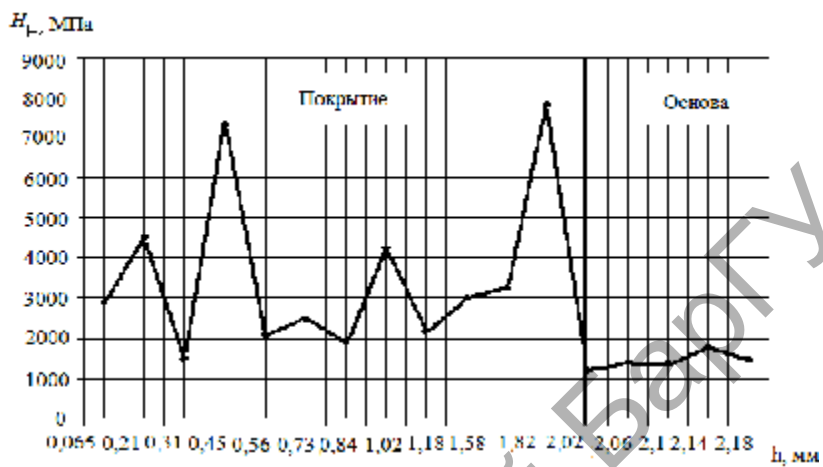
Рисунок 3.27 — Композиции № 2

При плазменном напылении подслоя из терморезающего порошка происходит практически мгновенное разрушение поверхности основы и, как следствие, её высокоскоростная пластическая деформация, обусловленные давлением ускоренных и разогретых до температуры плавления в плазменной струе частиц

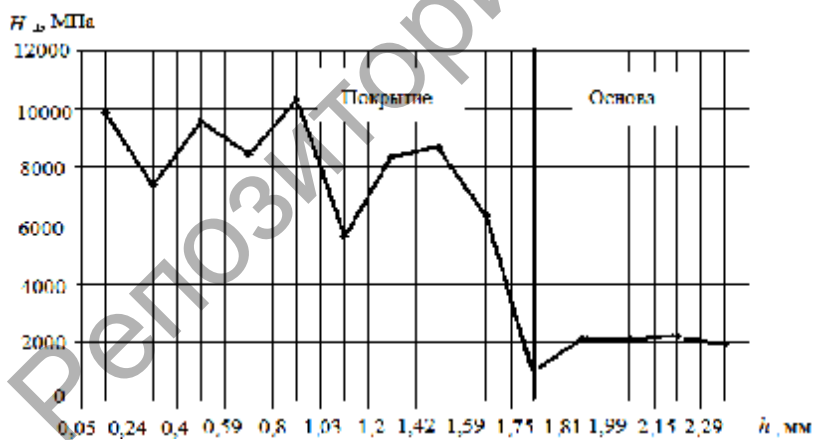
порошка при соударении с основой, что способствует возникновению диффузионной зоны между покрытием и металлом основы. Время, в течение которого поддерживается температура в контакте, совпадает со временем химического взаимодействия и кристаллизации частицы. Дополнительное тепло, выделяемое при экзотермической реакции, способствует дополнительному разогреву напыляемых частиц и основы, что увеличивает время кристаллизации частицы, а следовательно, и время химического взаимодействия между напыляемым материалом и основой. Протекание данной стадии взаимодействия гарантирует также диффузионное взаимодействие напыляемого материала и основы, следовательно, повышается прочность сцепления. Образование диффузионной зоны между покрытием и основой подтверждает рентгеноспектральный анализ (см. рис. 3.26 и 3.27). Глубина проникновения элементов покрытия составляет до 10...12 мкм. С ростом величин давления и температуры частиц за счёт напыления на оптимальных режимах диффузионная зона может достигать значения ~ 25 мкм.

Основным физико-механическим свойством упрочнённого слоя, определяющим его эксплуатационные характеристики, и в первую очередь износостойкость, является микротвёрдость. Результаты измерений представлены на рисунках 3.28 и 3.29.

Исследование микротвёрдости показало, что отдельные фазы газотермических композиционных покрытий достигают значений 10 805 МПа и 10 025 МПа для композиций № 1 и 2 соответственно, при этом средняя микротвёрдость этих покрытий составляет 7 584 МПа и 7 513 МПа. Меньшее значение микротвёрдости композиции № 2 обусловлено большим содержанием меди. В состав покрытий входят компоненты на основе меди (ПГ-19М-01, композиция № 2), меди и никеля (ПР-НД42СР, композиция № 1), а также на основе железа, легированного хромом, ванадием, бором, кремнием (ПР-Х4Г2Р4С2Ф), поэтому полученные покрытия имеют пластичную основу (медь—никель—железо) и твёрдые включения в виде частиц карбидов и боридов. Это объясняет разброс микротвёрдости по толщине покрытия (5 660...10 327 МПа — композиция № 1 и 6 720...10 025 МПа — композиция № 2).



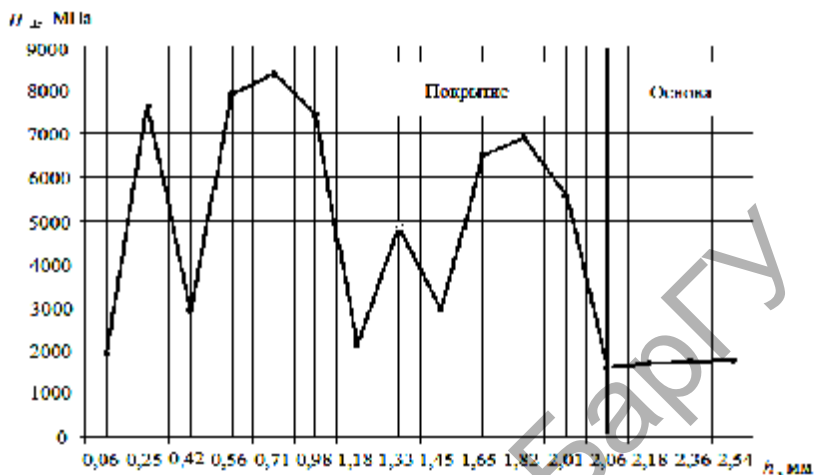
а)



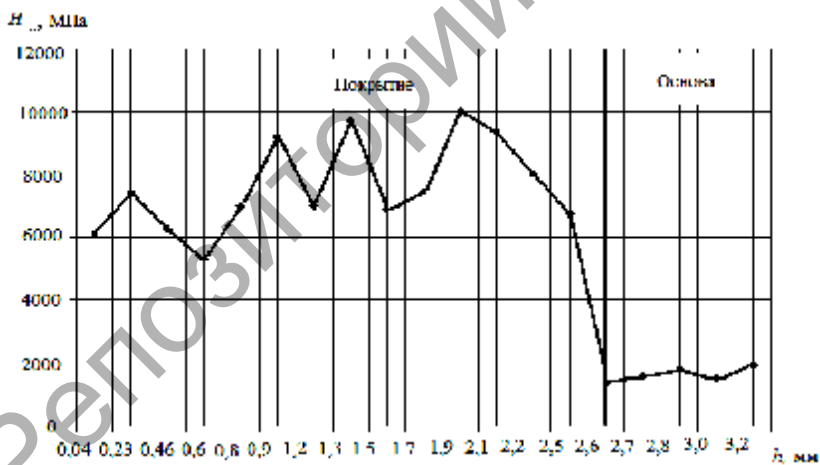
б)

а — до оптимизации; б — напыление на оптимальных режимах

Рисунок 3.28 — Микротвёрдость покрытий из композиции № 1



a)



b)

a — до оптимизации; б — напыление на оптимальных режимах

Рисунок 3.29 — Микротвёрдость покрытий из композиции № 2

Такая структура является оптимальной с точки зрения износостойкости и соответствует структуре правила Шарпи: включения твёрдых компонентов, распределённых в более мягкой матрице. Высокие значения микротвёрдости вблизи основы, а также исследование структуры покрытий и их элементного состава позволяют сделать вывод о возникновении химического взаимодействия компонентов напыляемого материала и основы с образованием переходной зоны, что обуславливает достижение высокой прочности сцепления покрытия с основой.

Исследование пористости покрытий (рис. 3.30) показало, что поры имеют неправильную форму.

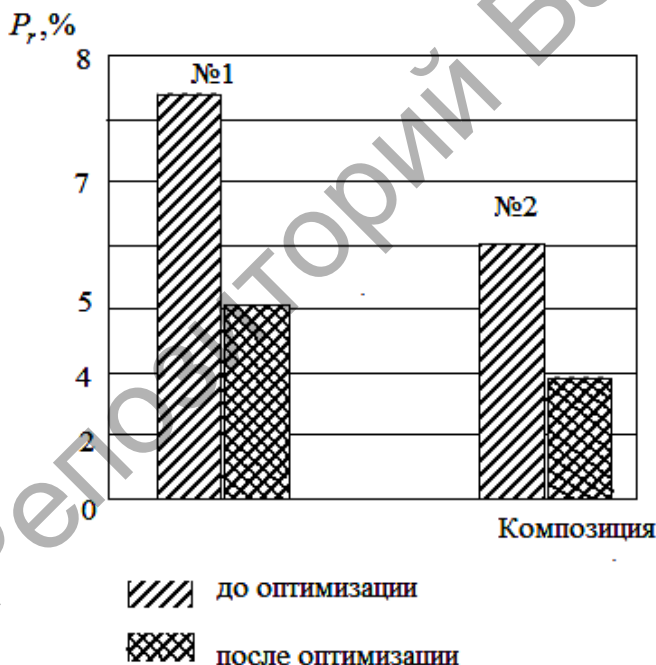


Рисунок 3.30 — Диаграмма пористости покрытий

Площадь пор в сечении, нормальном границе раздела между покрытием и основой, меньше, чем в сечении, параллельном границе. Данный фактор обусловлен особенностями послойного формирования покрытий. Пористость снижает прочность покрытия и может являться очагами зарождения усталостных трещин, поэтому необходимо стремиться к её снижению для деталей, работающих при циклических нагрузках. Открытая пористость полученных покрытий, не снижая прочности покрытия ввиду её небольшой величины (менее 5%), способствует сохранению смазки в условиях граничного трения. Кроме того, из диаграммы видно, что на величину пористости оказывают немаловажное влияние и режимы напыления, так, покрытия, напылённые на оптимизированных режимах, имеют пористость в 1,5 раза ниже, чем покрытия, напылённые на рекомендованных режимах.

Остаточные напряжения в высокой степени могут повлиять на прочность сцепления с основой. Согласно исследованиям [154], параметр $\sigma_{\text{сц}}$ может быть описан формулой

$$\sigma_{\text{сц}} = \sigma_{\text{max}} S - \sigma_{\text{ост}}, \quad (3.3)$$

где σ_{max} — прочность сцепления в соединении при контакте атомов соприкасающихся поверхностей, МПа;

S — относительная площадь взаимодействия покрытия с основой;

$\sigma_{\text{ост}}$ — величина остаточных напряжений, МПа.

Из приведённого следует, что при слабом развитии контактов между атомами частиц покрытия и основы и одновременно высоком уровне остаточных напряжений может происходить отслоение покрытия сразу после напыления. Следовательно, влияние остаточных напряжений должно быть учтено при изучении общей картины формирования покрытий.

В процессе напыления высокий уровень остаточных напряжений в приповерхностном слое формируется уже на стадии подготовки образцов при механической либо дробеструйной обработке. Исследовалось влияние на прочность сцепления напряжённого состояния образцов, возникшего в результате операций подготов-

ки поверхности и собственно напыления, ставилась задача оценить изменение напряжённого состояния образцов при напылении на них композиционных покрытий. Покрытия наносились на пластины, предварительно подвергнутые дробеструйной обработке, а также шлифованные без подачи смазочно-охлаждающей жидкости. По каждому варианту технологии было изготовлено пять образцов. Необходимость в изготовлении образцов, не прошедших дробеструйную обработку, возникла в процессе исследования, так как потребовалось точнее оценить изменение напряжённого состояния непосредственно после напыления. Это связано с тем, что изменение прогиба дробеструйных образцов после напыления оказалось меньше, чем разность между максимальным и минимальным значением измеряемой величины после дробеструйной обработки. Производилось последовательное изменение величины прогиба образцов после каждой операции. Во всех случаях имел место положительный прогиб образцов.

Напыление покрытий на основе железа увеличивает напряжения сжатия, возникающие в процессе подготовки поверхности под напыление. Увеличение прогиба образцов составляет 20...50 мкм, что соответствует 30...45% от величины прогиба после шлифования и 3...10% данной величины после дробеструйной обработки. Рассчитанные по оценочной формуле значения остаточных напряжений составляют после дробеструйной обработки 130...170 МПа, после шлифования — 15...20 МПа. Величины $\sigma_{ост}$ в образцах с напылёнными покрытиями при указанных вариантах технологии подготовки поверхности находятся в пределах 160...200 МПа и 22...27 МПа соответственно. Это увеличение остаточных напряжений может быть обусловлено двумя факторами: первый — различие модулей упругости материалов основы и покрытия, второй — соотношение коэффициентов линейного расширения материалов покрытия и основы. Согласно исследованиям [78], наряду с неоднородным тепловым воздействием, различие коэффициентов линейного расширения является наиболее существенным фактором в процессе формирования остаточных напряжений при напылении. Если $k_{опкр} < k_{осн}$, то в образцах формируются напряжения сжатия.

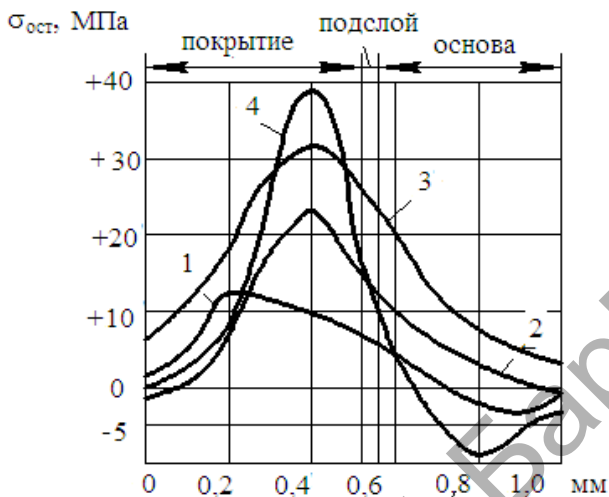
Таким образом, ввиду близости свойств материалов покрытия и основы, напыление порошков на основе железа приводит к незначительному изменению напряжённого состояния, сформировавшегося после дробеструйной обработки: в образцах несколько увеличиваются напряжения сжатия. Нами была выдвинута гипотеза, что последнее характерно в целом для напыления порошков на основе железа.

Как следует из формулы (3.3) для определения $\sigma_{\text{сц}}$, отслоению покрытий способствуют напряжения растяжения, а не сжатия. Следовательно, напряжённое состояние покрытий, сформировавшееся преимущественно в процессе подготовки образцов к напылению, не должно отрицательно сказаться на прочности их сцепления с основой.

Для снижения величины остаточных напряжений производился подогрев основы и напыление промежуточного слоя из терморезирующего материала NiAl со значением коэффициента термического расширения (КТР), промежуточным между основой и покрытием (рис. 3.31).

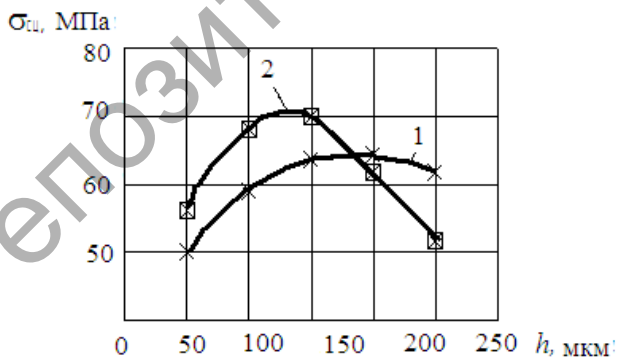
Изучено влияние толщины подслоя из терморезирующего материала на прочность сцепления газотермических покрытий из разработанных композиций (рис. 3.32). Экспериментально установлены толщины подслоя, при которых прочность сцепления имеет максимальную величину. Для покрытия из композиции № 1 она составляет 150...200 мкм, для композиции № 2 — 100...150 мкм.

Исследование остаточных напряжений и их распределения по толщине композиции «покрытие—подслой—основа» позволило определить, что применение выбранного подслоя и режимов его напыления в сочетании с разработанными композициями позволяет снизить уровень остаточных напряжений в покрытии до 3 раз. Кроме того, напыление на режимах, определённых в ходе экспериментальных исследований, не приводят к возникновению высоких опасных растягивающих напряжений, их величина (менее 12 МПа) не превышает прочности сцепления покрытия с основой. В процессе работы на опорные поверхности валов БДМ действуют сжимающие напряжения, поэтому растягивающие напряжения, не превышающие прочности сцепления покрытия с основой, могут увеличить ресурс валов бумагоделательного оборудования с покрытиями.



1 — композиция № 1; 2 — композиции № 2; 3 — композиция № 1 без подслоя; 4 — композиция № 2 без подслоя

Рисунок 3.31 — Распределение остаточных напряжений по толщине композиции «покрытие—подслоя—основа»



1 — композиция № 1; 2 — композиция № 2

Рисунок 3.32 — Зависимость прочности сцепления покрытий от толщины (h) подслоя ПТ-НА-01

Выводы

1. Разработана методика определения максимальной удельной нагрузки, действующей на опорную поверхность вала, в зависимости от изменения угла контакта. Расчёт максимальной нагрузки по предложенному методу позволяет определить её значение для валов различной массы и различных схем нагружения. Сопоставляя расчётные значения удельной нагрузки и обеспечиваемой напылением прочности сцепления покрытия с основой, можно спрогнозировать работоспособность упрочнённого вала. Так, для наиболее распространённых валов массой не более 4 т при угле контакта 10° удельная нагрузка не превышает 50 МПа, таким образом, технология газотермического напыления должна обеспечить прочность покрытия с основой не менее 55 МПа.

2. Разработаны составы композиций для получения покрытий с требуемыми физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. На основе экспресс-испытаний для дальнейших исследований были отобраны две композиции, покрытия из которых обладают наибольшей износостойкостью. Построены математические модели зависимости прочности сцепления покрытий с основой и их износостойкости от состава композиций, позволившие определить оптимальные соотношения компонентов (композиция № 1: 30,9% ПТ-НА-01 + 32,7% ПР-Х4Г2Р4С2Ф + 36,4% ПР-НД42СР; композиция № 2: 18,9% ПТ-НА-01 + 41,4% ПГ-19М-01 + 39,7% ПР-Х4Г2Р4С2Ф). Покрытия, напылённые из композиций оптимальных составов, обладают прочностью сцепления 55...65 МПа при износостойкости не ниже 0,1 ч / км.

3. Разработана математическая модель зависимости прочности сцепления покрытия с основой от параметров шероховатости поверхности. Данная модель позволила определить параметры шероховатости (R_a — 40 мкм; R_p — 80 мкм; R_{max} — 100 мкм), обеспечившие прочность сцепления не менее 65 МПа. Определены режимы подготовки поверхности и геометрия режущего инструмента со вставкой из гексанида, обеспечивающие оптимальные параметры шероховатости (скорость резания, равная 7 м / мин при диаметре напыляемой поверхности 50 мм, подача, равная 0,75 мм / об, радиус при вершине резца, равный 0,2 мм, главный и вспомогательные углы в плане, равные 40° ; 20° ; -5°). Результаты экспериментальных исследований влияния параметров шероховатости на прочность сцепления покрытия с основой адекватны математической модели и подтвердили правильность определения режимов резания.

4. Экспериментальные исследования влияния параметров плазменного напыления подслоя на прочность сцепления позволили определить область технологических параметров, обеспечивающих прочность сцепления покрытия с основой 65...70 МПа: сила тока дуги — 240...250 А; напряжение — 80...85 В; дистанция напыления 170...180 мм; расход плазмообразующего газа — 3,0...3,5 м³ / ч; расход порошка 1,5...2,5 кг / ч. Проведённые исследования влияния продолжительности плазменного напыления и его производительности на температуру нагрева основы позволили сделать вывод о том, что в целях предотвращения катастрофического перегрева напыляемой детали

и получения качественного покрытия необходимо производить вначале плазменное напыления подслоя на предварительно подогретую до температуры 70...90°С основу, а затем газопламенное напыление основной части ГТП.

5. Разработана математическая модель зависимости прочности сцепления покрытия с основой от расходов горючих газов (МАФ, кислород) и транспортирующего газа (воздух), которая позволила определить параметры, обеспечивающие высокую прочность сцепления покрытия с основой 66,8 МПа (расчётное значение): $X_1 = 1,3$; $X_2 = 4,5$; $X_3 = 0,17$.

6. Проведены исследования структуры и физико-механических свойств покрытий, напылённых на оптимальных режимах (дистанция напыления — 180 мм, расход МАФ — 1,0...1,2 м³/ч, расход кислорода — 4,0...4,5 м³/ч, расход воздуха — 0,2 м³/ч, расход порошка — 2...3 кг/ч) газопламенным методом при обеспечении определённых параметров шероховатости и оптимальных режимах плазменного напыления. Результаты исследований подтвердили правильность выбора технологии упрочнения тяжело нагруженных деталей и полученных режимов её операций (подготовки поверхности, напыления подслоя и основной части покрытия). Полученная структура покрытий соответствует правилу Шарпи, напылённые частицы хорошо пластифицированы, практически не окружены окисными плёнками, покрытие имеет невысокую пористость (менее 5%), микротвёрдость отдельных фаз достигает 10 000 МПа, а основы — 7 500 МПа.

7. Рентгеноспектральным анализом установлено, что диффузионная зона отдельных участков достигает глубины 10...25 мкм, что обеспечивает высокую прочность сцепления всего покрытия (65...75 МПа).

8. Установлено, что применение выбранного подслоя и режимов его напыления в сочетании с разработанными композициями позволяет снизить уровень остаточных напряжений в покрытии до 3 раз. Кроме того, напыление на режимах, определённых в ходе экспериментальных исследований, не приводит к возникновению высоких опасных растягивающих напряжений, их величина (менее 12 МПа) не превышает прочности сцепления покрытия с основой. В процессе работы на опорные поверхности валов БДМ действуют сжимающие напряжения, поэтому растягивающие напряжения, не превышающие прочности сцепления покрытия с основой, могут увеличить ресурс валов бумагоделательного оборудования с покрытиями.

РАЗДЕЛ 4
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИЦИОННЫХ
ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

**4.1 Физико-математическая модель
изнашивания газотермических покрытий
при фреттинг-коррозии**

На повреждения от фреттинг-коррозии влияют такие факторы, как нормальная нагрузка, амплитуда проскальзывания, состав атмосферы и т. д. Математическое описание такого явления представляет определённые трудности в связи с многообразием физико-химических процессов, сопровождающих фреттинг-коррозию. Кроме того, сегодня нет единого мнения по поводу механизма фреттинга и относительной важности конкурирующих процессов.

Из всех механических характеристик износостойкость металлов лучше всего коррелирует с усталостной прочностью, при этом необходимо учитывать химическую активность материала и его способность рассеивать механическую энергию. Так, авторы [8; 155] предложили для оценки сопротивляемости металлов действию резонансного нагружения критерий вибропрочности R , вычисляемый по формуле

$$R = \frac{\sigma_{-1}}{k} \delta,$$

где σ_{-1} — предел выносливости материала;

k — коэффициент, учитывающий снижение σ_{-1} в реальных условиях;

δ — декремент колебаний при максимальной амплитуде.

Однако исследование авторами износостойкости материалов в условиях фреттинг-коррозии с учётом критерия вибропрочности не дало положительных результатов [12]. Важной характеристикой для оценки поведения материалов в условиях

фреттинг-коррозии может явиться скорость, с которой поверхностные слои поддаются передеформированию. Износостойкость материалов в этих условиях тесно связана с пластическими и упруго-пластическими свойствами, приобретаемыми поверхностными слоями металла в процессе вибронагружения.

Важным параметром при определении степени повреждаемости металла в условиях фреттинг-коррозии является градиент скорости деформации в поверхностных слоях. По мнению В. Д. Кузнецова, критический градиент скорости деформации твёрдого тела может служить характеристикой пластичности материала. В зависимости от скорости деформации в поверхностном слое происходит либо разрушение твёрдого тела (скорость деформации превышает критическую величину), либо его течение (деформирование происходит со скоростью меньше критической) [156].

Используя представления В. Д. Кузнецова об упругости деформирования твёрдых тел W , в качестве критерия износостойкости можно принять зависимость [156]

$$W = \frac{\sigma_s}{G} \delta_\tau, \quad (4.1)$$

где σ_s — предел текучести материала;

G — модуль сдвига;

δ_τ — декремент колебаний при действии тангенциальных нагрузок.

Предложенная зависимость (4.1) позволяет с достаточной степенью точности оценить износостойкость различных материалов. Недостаток её в том, что она не учитывает в полной мере проявление коррозионного фактора.

Исследователь Н. Н. Uhlig [160] указывает, что любая теория фреттинга должна принимать в расчёт следующие установленные факты:

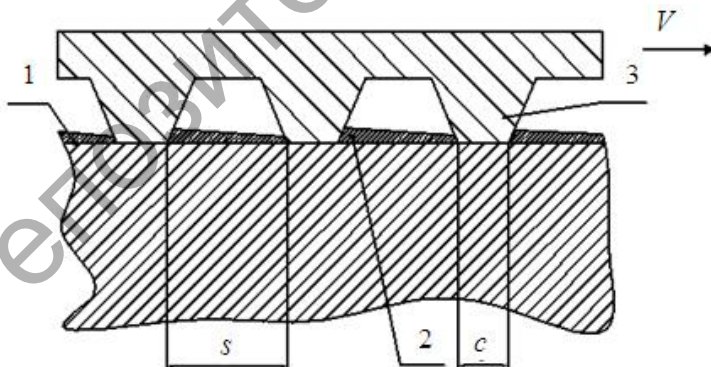
- повреждение от фреттинга уменьшается в вакууме или инертной атмосфере;
- продукты разрушения, образующиеся при фреттинге железа, состоят главным образом из Fe_2O_3 ;

- за данное число циклов более серьёзное повреждение происходит при низких частотах по сравнению с высокими частотами;
- потери металла увеличиваются с увеличением нагрузки и относительного проскальзывания;
- более серьёзное повреждение происходит при низкой температуре;
- повреждение больше в сухом воздухе, чем во влажном.

Объясняя свою модель, (рис. 4.1) Н. Н. Uhlig объединяет два механизма:

1. Механическое действие разрушает окисные плёнки на поверхности, вскрывая чистый и, возможно, деформированный металл, который будет очень активным и в присутствии воздушной атмосферы станет окисляться очень быстро в течение половины цикла после вскрытия, с тем чтобы быть разрушенным при возвратной половине цикла.

2. Удаление металлических частиц с поверхности в тонко размельчённой форме путём шлифования, либо путём образования точек сварки в местах контакта, которые затем разрушаются по иной поверхности, чем первоначальная поверхность



1 — граница раздела; 2 — окисел; 3 — неровность

Рисунок 4.1 — Модель фреттинга на поверхности металла, покрытого окислом (автор — Н. Н. Uhlig) [12]

соприкосновения, либо непосредственно путём срезания, либо в результате локального развития усталостных процессов. Состав атмосферы не имеет значения при этих процессах, за исключением случая усталостных явлений, когда может добавиться элемент коррозионной усталости.

Предполагается, что повреждение вызывается регулярным рядом неровностей, стирающих окисную плёнку, которая сразу же начинает формироваться вновь, чтобы снова быть стёртой в следующем цикле. Вклад этого действия в общий объём повреждения рассчитывается в предположении, что рост окисной плёнки происходит по логарифмическому закону. Кроме того, допускается, что неровности также врезаются в металлическую поверхность и непосредственно удаляют металл. Потеря массы материала $W_{\text{корр}}$ за цикл, вызванная соскабливанием окисной пленки, описывается уравнением

$$W_{\text{корр}} = 2nlck \ln \left(\frac{s}{2ff\tau} + 1 \right) \quad (4.2)$$

где n — число круговых неровностей на единицу площади;
 l — расстояние, проходимое неровностью за полупериод цикла, т. е. амплитуда проскальзывания;
 c — диаметр неровности;
 s — среднее расстояние между неровностями;
 f — частота циклов;
 τ, k — постоянные.

Потеря массы $W_{\text{мех}}$ за цикл, вследствие пропахивающего действия, вычисляется из выражения

$$W_{\text{мех}} = \frac{2k'lP}{p_0} = k_2lP,$$

где k', k_2 — постоянные;
 P — нормальная нагрузка;
 p_0 — давление текучести.

Раскладывая в ряд логарифмический член в уравнении (4.2), Н. Н. Uhlig пренебрегает всеми членами ряда, кроме первого. Таким образом, он фактически предполагает линейную скорость окисления. Тогда уравнение (4.2) принимает упрощённый вид:

$$W_{\text{корр}} = \frac{ncks}{f\tau}. \quad (4.3)$$

Расстояние между неровностями s равняется $n^{1/2}$; общая действительная площадь контакта составляет $n\pi\left(\frac{c}{2}\right)^2$, из чего следует, что

$$W_{\text{корр}} = \frac{k_0 n^{1/2} - k_1 P}{f}, \quad (4.4)$$

где $k_0 = \frac{2}{\sqrt{\rho_0 \pi}} \frac{k}{\tau}$ и $k_1 = \frac{4}{\rho_0 \pi} \frac{k}{\tau}$.

Объединив уравнения (4.3) и (4.4), получим выражение

$$W_{\text{общ}} = (k_0 n^{1/2} - k_1 P) \frac{N}{f} + k_2 l P N,$$

где N — общее число циклов.

Это выражение вполне удовлетворительно соответствует экспериментальным данным Н. Н. Uhlig'a, так как оно является линейным по числу циклов, параболическим по нагрузке и гиперболическим по частоте [17]. Кроме того, члены формулы, описывающие коррозионные процессы, учитывают различное поведение металла при различных условиях окружающей среды (например, влияние влажности) и при различной температуре. Недостатки этого анализа заключаются в том, что здесь не принимается во внимание особый характер возвратно-поступательного движения, не рассматривается влия-

ние амплитуды проскальзывания. Формула учитывает только общее пройденное расстояние. Частота f вводится как член, учитывающий скорость.

Известно, что процессы пластического деформирования сопровождаются рассеянием в металле части затраченной внешней работы в результате структурных изменений [161; 162]. При фреттинг-коррозии величина рассеянной энергии будет определяться не только пластической деформацией, но и интенсивностью окислительных процессов и величиной изменения площади свободных поверхностей. Используя принципы неравновесной термодинамики необратимых процессов, описываемых с помощью диссипативной функции, авторы [13] предложили модель изнашивания материала при фреттинг-коррозии [6; 8]:

$$I = a_1 p A N + (a_2 + a_3 p + a_4 p^2) \frac{N}{f}, \quad (4.5)$$

где p — удельная нагрузка;
 A — амплитуда скольжения;
 N — число циклов нагружения;
 f — частота колебаний;
 a_1, \dots, a_4 — коэффициенты, равные.

$$a_1 = -\frac{2k\mu}{c_{11}\Delta\sigma_\mu}; \quad c_{11} = \frac{6}{d\rho_m}; \quad (4.6)$$

$$a_2 = \frac{v_0 c_{11} \Delta\sigma_\mu (c_5 A_{cp} - c_6 \Delta\sigma_0 - c_7 \Delta\sigma_\mu) + c_5 A_{cp}^2 + c_8 \Delta\sigma_0 - 2c_6 \Delta\sigma_0 A_{cp}}{c_{11} \Delta\sigma_\mu} - \frac{c_7 \Delta\sigma_\mu A_{cp} + c_9 \Delta\sigma_0 \Delta\sigma_\mu}{c_{11} \Delta\sigma_\mu}; \quad (4.7)$$

$$a_3 = \frac{(v_0 c_2 c_{11} \Delta\sigma_\mu + 2c_2 A_{cp} - 2c_3 \Delta\sigma_0 - c_4 \Delta\sigma_\mu) b k_5}{c_{11} \Delta\sigma_\mu \beta}; \quad (4.8)$$

$$a_4 = \frac{c_1 k_5^2 (\eta_1 + \frac{1}{2} \eta_3 F_{\text{тр}}^2)}{c_{11} \Delta \sigma_{\mu} \beta^2}; \quad (4.9)$$

$$b = \frac{1}{12} (\sqrt{\eta_1 + \eta_2 F_{\text{тр}} + \eta_3 F_{\text{тр}}^2} + \\ + 4 \sqrt{\eta_1 + \frac{1}{\sqrt{2}} F_{\text{тр}} \eta_2 + \frac{1}{2} \eta_3 F_{\text{тр}}^2} + \\ + \sqrt{\eta_1 - \eta_2 F_{\text{тр}} + \eta_3 F_{\text{тр}}^2} + \\ + 4 \sqrt{\eta_1 - \frac{1}{\sqrt{2}} F_{\text{тр}} \eta_2 + \frac{1}{2} \eta_3 F_{\text{тр}}^2} + 2\sqrt{\eta_1}), \quad (4.10)$$

- где $\eta_1, \dots, \eta_3, c_1, \dots, c_{11}$ — постоянные;
- k — постоянная, характеризующая долю поверхностной энергии;
- k_5 — коэффициент пропорциональности;
- μ — коэффициент трения скольжения;
- d — размер частиц износа;
- ρ_m — плотность материала;
- ν_o — стехиометрический коэффициент окисла в уравнении реакции;
- $\Delta \sigma_{\mu}$ — изменение удельной поверхностной энергии металла;
- $\Delta \sigma_o$ — изменение удельной поверхностной энергии окисла;
- $A_{\text{ср}}$ — средство химической реакции;
- $F_{\text{тр}}$ — коэффициент трения покоя.

Анализируя формулы (4.5)—(4.10), можно сделать вывод, что износ материала при фреттинг-коррозии имеет параболическую зависимость от удельной нагрузки p , гиперболическую — от частоты колебаний f , линейную от амплитуды скольжения A и количества циклов N . Из уравнений (4.6) и (4.9) видно, что коэффициенты a_1 и a_4 не зависят от химических характеристик

материала и среды, в которой протекает фреттинг-коррозия, а являются функциями физических свойств материала (поверхностной энергии, плотности и склонности к пластическому деформированию), а также условий трения, т. е. эти члены уравнения (4.5) определяются физико-механическими факторами фреттинг-коррозии. Рассматривая уравнения (4.7) и (4.8), можно сделать вывод, что коэффициенты a_2 и a_3 отражают физико-механические и химические свойства материала. Причем коэффициент a_2 больше зависит от химических факторов, чем коэффициент a_3 , так как химическое сродство $A_{\text{ср}}$ представлено второй степенью, а коэффициент a_3 также зависит и от условий трения (коэффициента трения покоя).

Чтобы рассмотреть более подробно зависимость коэффициентов a_2 и a_3 от химической активности газовой среды, в которой протекает фреттинг-коррозия, запишем уравнение для определения сродства химической реакции

$$A_{\text{ср}} = -\sum_k \varphi_k \nu_k, \quad (4.11)$$

где φ_k — химический потенциал компонента реакции;

ν_k — стехиометрический коэффициент компонента реакции [163].

Так как при фреттинг-коррозии в химической реакции участвуют три компонента (материал, газовая среда и окислы), то можно записать следующее выражение:

$$A_{\text{ср}} = \nu_m \varphi_m + \nu_g \varphi_g - \nu_o \varphi_o,$$

где ν_m, ν_g, ν_o — стехиометрические коэффициенты материала, газового компонента и окисла соответственно;

$\varphi_m, \varphi_g, \varphi_o$ — химические потенциалы материала, газового компонента и окисла соответственно.

Величина химического потенциала активного газового компонента в реакции φ_g зависит от его парциального давления, что показано зависимостью

$$\varphi_g = \varphi_g^0 + RT \ln \frac{P_g}{P_g^0}, \quad (4.12)$$

где φ_g^0 — химический потенциал компонента в его стандартном состоянии;

P_g^0 — стандартное давление;

P_g — парциальное давление активного компонента газа [164].

Если сравнивать протекание фреттинг-коррозии, например, в среде кислорода и в среде воздуха при одинаковом давлении, то согласно формуле (4.12), химический потенциал кислорода будет меньше химического потенциала воздуха, так как парциальное давление кислорода в воздухе ниже. Соответственно, падение химического потенциала, согласно формулам (4.7), (4.8) и (4.11), приведёт к уменьшению коэффициентов a_2 и a_3 , т. е. при фреттинг-коррозии в среде воздуха износ будет ниже, чем в среде кислорода.

Для упрощения обработки результатов исследований коэффициенты $a_1 \dots a_4$ можно рассчитать, применив способ наименьших квадратов. Удельная нагрузка, амплитуда и частота колебаний определяются исходя из условий работы конкретной детали, в нашем случае — валов БДМ.

Из анализа зависимостей для коэффициентов $a_1 \dots a_4$ следует, что разрушаемость при фреттинг-коррозии можно снизить, если уменьшить химическую активность среды или подобрать материал покрытия, который будет обладать высокими прочностными свойствами, высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью.

4.2 Исследование изнашивания композиционных газотермических покрытий при фреттинг-коррозии

Результаты проведённых испытаний показаны на рисунках 4.2—4.5.

Интенсивность изнашивания покрытий из разработанных композиций при удельной нагрузке до 40 МПа ниже, чем у стали 45, и износ для композиции № 1 не превышает 35 мкм, для композиции № 2 — 22 мкм. С увеличением нагрузки свыше 40 МПа интенсивность изнашивания, как у покрытий из разработанных композиций, так и для стали 45, уменьшается, причём это уменьшение у композиции № 1 значительно больше, чем у других.

Такой характер зависимостей износа покрытий из разработанных композиций может быть объяснён следующим образом. При сравнительно небольших удельных нагрузках (до 30 МПа) преобладающим видом разрушения является схватывание и окислительный процесс. Так как в композиционных покрытиях на границах твёрдых составляющих происходит накопление дислокаций и вакансий, то из-за малой их подвижности на поверхностях скольжения не создаются центры схватывания.

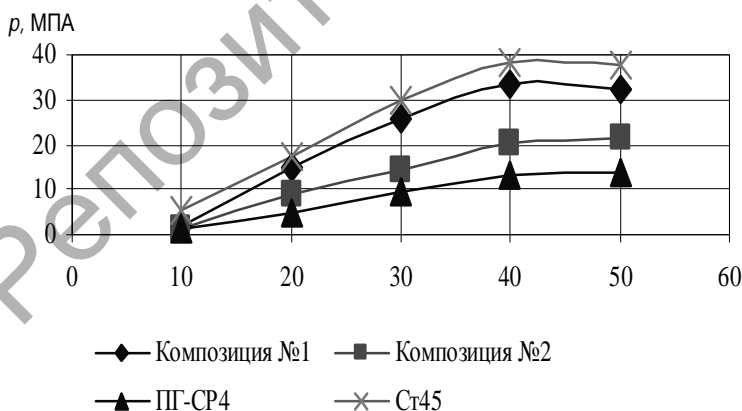


Рисунок 4.2 — Зависимость износа материалов от удельной нагрузки ($A = 0,06$ мм, $N = 1 \cdot 10^6$, $f = 25$ Гц)

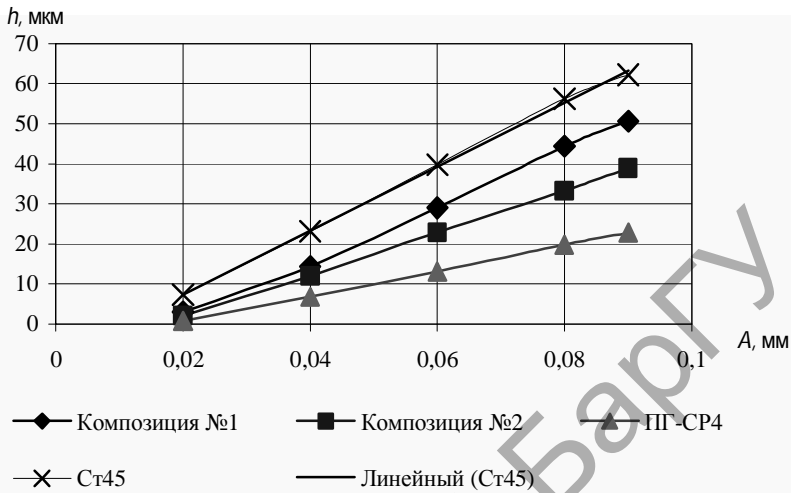


Рисунок 4.3 — Зависимость износа материалов от амплитуды колебаний ($p = 40$ МПа, $N = 1 \cdot 10^6$, $f = 25$ Гц)

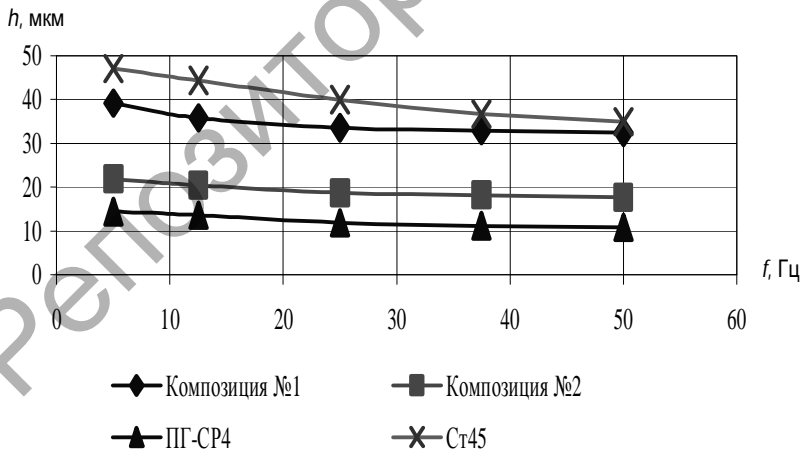


Рисунок 4.4 — Зависимость износа материалов от частоты колебаний ($A = 0,06$ мм, $N = 1 \cdot 10^6$, $p = 40$ МПа)

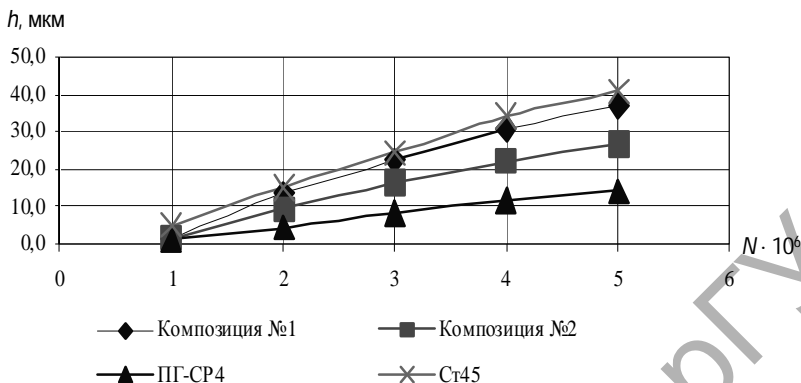


Рисунок 4.5 — Зависимость износа материалов от числа циклов ($A = 0,06$ мм, $p = 40$ МПа, $f = 25$ Гц)

Второй причиной сравнительно низкой интенсивности изнашивания полученных покрытий при удельной нагрузке до 30 МПа являются меньшие температуры в зоне трения по сравнению со сталью 45, возникающие за счёт прохождения упругих волн, что снижает интенсивность окислительных процессов у данных покрытий.

С увеличением удельной нагрузки примерно до 40 МПа интенсивность изнашивания как стали 45, так и полученных композиционных покрытий возрастает до максимального значения. На этой стадии износа происходит разрушение вследствие усталости выступов, создаются первичные продукты износа, часть из которых (Ni, Fe) окисляется (аналогично для стали 45). Однако при разрушении покрытий большую часть продуктов износа составляют частицы первичных кристаллов, у стали 45 — железо. Интенсивность окислительных процессов при фреттинг-коррозии стали 45 выше, чем при аналогичном разрушении композиционных покрытий. Поэтому у образцов из стали 45 значительно интенсивнее происходит усталостное разрушение.

С увеличением удельной нагрузки свыше 40 МПа интенсивность изнашивания образцов с покрытиями и из стали 45

уменьшается. Это явление может быть объяснено следующим образом: увеличение удельной нагрузки приводит к образованию большего количества продуктов изнашивания и их дроблению, что, в свою очередь, приводит к погашению относительного движения этой прослойки продуктов износа (улучшается отвод частиц из зоны трения, уравнивая их возникновение) и созданию условий скольжения или качения продуктов износа между собой и поверхностями контакта, что способствует снижению интенсивности изнашивания.

Интенсивность изнашивания образцов с покрытиями из разработанных композиций и из стали 45 от амплитуды колебаний является линейной (см. рис. 4.3). Износ, независимо от природы материалов, прямо пропорционален величине амплитуды колебаний в исследуемом диапазоне значений.

При пониженных амплитудах скольжения интенсифицируются процессы локального абразивного действия продуктов износа и усталостного разрушения металла, усугубленные химической активизацией поверхностей трения. Эти процессы происходят интенсивнее при трении образцов из стали 45, поэтому и интенсивность изнашивания их выше по сравнению с напылёнными образцами.

С увеличением амплитуды повышается вероятность контакта вновь образованных (химически активных) поверхностей и их схватывание. При этом не исключено, что с увеличением амплитуды колебаний микровыступы одной поверхности начинают интенсивнее взаимодействовать с неровностями сопряжённой с ней поверхности. В результате возрастает количество знакопеременных взаимодействий в пятнах фактического контакта, что приводит к усталостному выкрашиванию. Для образцов с покрытиями из разработанных композиций интенсивность указанных процессов ниже, чем для стальных образцов (см. рис. 4.4).

С увеличением частоты колебаний (примерно до 25 циклов в секунду) износ убывает до минимального значения и впоследствии стабилизируется.

Как отмечалось ранее, исходя из представлений различных исследователей (I.-M. Feng, H. H. Uhlig), существует критическая

частота, величина которой зависит от реакционной способности материала. Было установлено, что устойчивые к окислению материалы мало реагируют на изменение частоты колебаний, и действительно, как показывают результаты проведённых экспериментов (см. рис. 4.4), покрытия из разработанных композиций, содержащие твёрдые мелкодисперсные частицы, в меньшей степени реагируют на изменение частоты колебаний, чем сталь 45.

Снижение интенсивности изнашивания с увеличением частоты колебаний можно объяснить следующим образом: если считать, что абразивное действие отделившихся частиц металла зависит от степени их окисления, можно предположить, что при малых частотах колебаний вблизи металлической поверхности более вероятно образование твёрдых абразивных частиц окислов. При больших частотах плоскость раздела между окисленными и неокисленными частицами должна сдвигаться от металлической поверхности, так как скорость окисления частиц будет меньше. В этом случае интенсивность изнашивания при фреттинг-коррозии должна уменьшаться.

На характер повреждаемости при фреттинг-коррозии оказывает влияние и температурный фактор. Температура в зоне контакта при увеличении частоты колебаний повышается менее интенсивно для покрытий по сравнению со стальными образцами вследствие более низкого коэффициента трения.

Изнашивание покрытий и стали 45 зависит от числа циклов нагружения (см. рис. 4.5).

Интенсивность разрушения при фреттинг-коррозии возрастает с увеличением количества циклов реверсивного нагружения. Из графика видно, что износ покрытий из разработанных композиций ниже, чем из стали 45. Это можно объяснить, как и в предыдущих опытах, характером образования и разрушения окисных плёнок, характером воздействия абразивных частиц, устойчивостью к окислению и т. п.

Следует отметить, что при количестве циклов выше $3 \cdot 10^6$ интенсивность изнашивания испытываемых образцов, как из стали 45, так и с покрытиями, снижается. Это явление можно объяснить тем, что с увеличением количества циклов происходит накоп-

ление мелкодисперсных частиц (продуктов износа) в зоне контакта, что уменьшает металлический контакт, уменьшает относительное движение и создаёт условия их скольжения или качения между собой и поверхностями контакта

Экспериментальные данные адекватны выдвинутой физико-математической модели изнашивания газотермических покрытий при фреттинг-коррозии (износ зависит параболически от удельной нагрузки, гиперболически от частоты колебаний, линейно от амплитуды микроскольжений и числа циклов испытаний). В условиях фреттинг-коррозии и под действием высоких удельных нагрузок в процессе эксплуатации слабо упрочняющаяся пластичная матрица легко переносится на сопряжённую поверхность, предохраняет её от повреждений и способствует релаксации напряжений. Это обуславливает высокую износостойкость полученных покрытий по сравнению со сталью 45, закалённой до 40...43 HRC (в 1,7...3,0 раза), сравнимую с износостойкостью оплавленного сплава ПП-СР4.

4.3 Комплексное исследование изнашивания газотермических покрытий при трении скольжения

Исследование изнашивания композиционных материалов проводили в диапазоне скоростей скольжения, равном 0,5...3,5 м/с, и давлении, равном 10...40 МПа.

Результаты проведённых исследований и измерений [148; 150; 152; 165] показаны на рисунках 4.6 и 4.7.

С увеличением удельной нагрузки свыше 30 МПа интенсифицируется процесс изнашивания (см. рис. 4.6) как для образцов с покрытиями, так и для образцов из стали 45. Износ покрытия из композиции № 1 несколько выше по сравнению со второй композицией. Это объясняется более высокой твёрдостью второго покрытия, содержащего меньшее количество меди (по объёму), так как увеличение данного компонента уменьшает количество твёрдых включений в пластичной матрице, что снижает сопротивление износу.

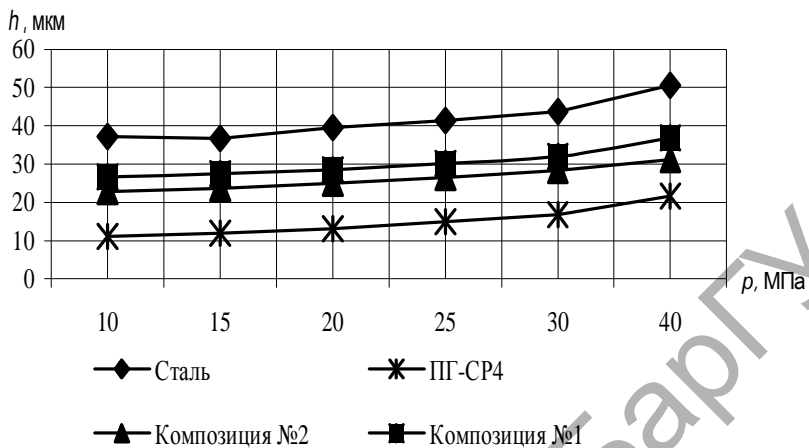


Рисунок 4.6 — Зависимость износа материалов от удельной нагрузки

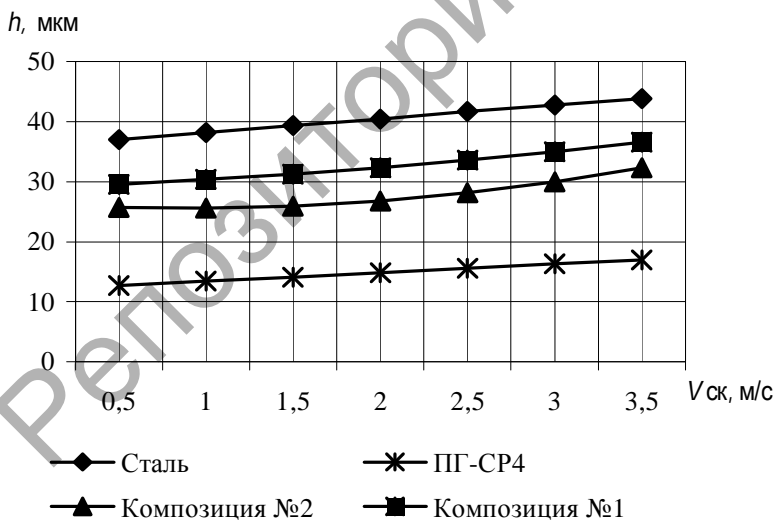


Рисунок 4.7 — Зависимость износа материалов от скорости скольжения

Однако процесс изнашивания второй композиции протекает плавно во всём диапазоне удельных нагрузок. Это явление можно объяснить пониженной склонностью к схватыванию покрытий в процессе трения.

Процесс изнашивания подобных покрытий включает усталостное изнашивание более мягкой структурной составляющей (медной, никелевой матрицы), обнажение более твёрдых составляющих (карбидных и боридных фаз) и их последующее выкрашивание.

Интенсивность изнашивания как покрытий, так и стали 45 прямо пропорциональна изменению скорости скольжения (см. рис. 4.7).

Износ композиций значительно меньше, чем износ стали 45, объясняется это наличием в составе покрытий хрома, никеля, углерода, бора, которые способствуют образованию твёрдых включений в виде боридов, карбидов в медно-никелевом каркасе, что увеличивает их сопротивление износу.

Как показывают результаты измерений, износ напылённых композиций № 1 и № 2 значительно меньше (в 1,5...3,0 раза), чем износ стали 45, закалённой до твёрдости 40...43 HRC, и сопоставим со сплавом ПГ-СР4 в широком диапазоне относительных скоростей скольжения и удельных нагрузок. Такие особенности напылённых покрытий можно объяснить как физико-механическими, так и физико-химическими свойствами этих покрытий.

По-видимому, изначально по всей поверхности контакта имеет место комбинация адгезионного (на более твёрдых участках) и упругопластического взаимодействия поверхностей, при котором продуктами изнашивания являются тонкодисперсные равновесные частицы. В общем случае для анализируемых условий трения характерно образование вторичных структур оксидного типа. По мере увеличения удельной нагрузки происходит нарушение когезионного взаимодействия между частицами, их выкрашивание и разрушение отдельных неоднородных частиц.

Коэффициент трения для всех испытуемых композиций плавно увеличивается с ростом относительной скорости скольжения и удельной нагрузки. Причём интенсивность увеличения коэффициента трения с повышением нагрузки в месте контакта больше, чем с увеличением относительной скорости скольжения.

Это увеличение коэффициента трения сопровождается ростом температуры в зоне трения, что приводит к переходу металла в состояние термической пластичности.

Для всех испытываемых композиций в широком диапазоне относительных скоростей скольжения и удельных нагрузок коэффициент трения составляет 0,06...0,12, что говорит о хороших антифрикционных параметрах этих покрытий.

Невысокий коэффициент трения испытываемых композиций объясняется особенностью их структуры и наличием на поверхности трения небольшого количества микроскопических каналов, что приводит к деконцентрации напряжений в поверхностях слоя покрытия.

Сопrotивляемость покрытия износу зависит от химического состава покрытия, который определяет твёрдость и теплостойкость, а также свойства образующихся в процессе трения вторичных структур. Структура покрытия состоит из мелкодисперсных боридов и карбидов, равномерно распределённых в насыщенной легированными элементами матрице, что определяет его повышенную твёрдость и теплостойкость.

Заметного различия в поведении композиций в зависимости от химического состава при нанесении не наблюдалось. Все порошки имеют одну основу и грануляцию, что определяет их сходные термодинамические свойства, они обладают одинаковыми достоинствами и недостатками с точки зрения технологии.

Фракция порошков в пределах 80...140 мкм, т. е. разброс частиц весьма значителен. Очевидно, наиболее крупные из них в газопламенной струе не могут в достаточной мере пластифицироваться, что и определяет явление отскока. Наличие большого количества окалины, окисляемость покрытий во время напыления определяется большим содержанием кислорода в струе при газопламенном напылении, что ведёт и к повышенному его содержанию в напылённом слое. Однако применение оптимальных режимов и составов композиций сводит к минимуму недостатки газопламенного напыления, обеспечивая низкую пористость покрытий (менее 5%), высокую пластификацию частиц напыляемого материала и равномерное распределение твёрдых включений.

4.4 Исследование влияния износостойкости на долговечность валов бумагоделательного оборудования после газотермического напыления

Исследованию изнашивания трущихся тел при неоднородном распределении давлений посвящён ряд работ [163; 164—166; 167]. Обобщённое уравнение изнашивания ϑ_i следующее:

$$\vartheta_i = c_i V^{n_i} p^{m_i} (\alpha, t),$$

где V — скорость скольжения, м / с;
 p — удельная нагрузка, МПа;
 α — угол контакта, град;
 t — время трения, с;
 c, n, m — постоянные, показывающие характер изнашивания и материалы трущихся пар, $1 \leq m \leq 3$, n , равная 1 при невысоких скоростях скольжения (V) [168].

Сформулированная в работе [42] усталостная теория изнашивания общепризнана. Согласно концепции усталостного разрушения при трении скольжения, отделение частиц износа происходит в результате циклических силовых воздействий на приповерхностные объёмы материалов трущейся пары. Ввиду дискретности контакта, обусловленного наличием микрорельефа поверхностей трения, при фрикционном взаимодействии тел имеет место циклическое изменение во времени возникающих на действительной площади соприкосновения микронеровностей контактных напряжений. В результате этого в деформированных объёмах материала зарождаются микротрещины, которые, развиваясь, смыкаются, приводя к образованию частиц износа.

Как известно, доминирующая роль в процессе зарождения микротрещин при объёмной усталости принадлежит сдвиговым касательным напряжениям. Следует предположить, что при трении скольжения как процессе фрикционной усталости зарождение и развитие усталостных микротрещин будут также главным

образом обусловлены действием касательного силового фактора — удельных сил трения на поверхности контакта тел. На основании этого предположения в работах [169—171] изложен и развит подход исследования кинетики изнашивания материалов при трении скольжения как процессе фрикционной усталости.

Согласно данным работы [169] основная система кинетических уравнений изнашивания имеет вид

$$\frac{dh_i(\alpha, L)}{dL} \Phi_i(\tau) = 1 \quad \text{или} \quad \frac{dh_i(\alpha, L)}{dL} = \Phi_i^{-1}(\tau), \quad (4.13)$$

где $h_i(\alpha, L) = 0$ при $L = 0$ ($t = 0$); $\tau = \tau[\alpha, L, h_i(\alpha, L)]$, $h_i(\alpha, L)L^{-1} = I_{hi}$;

$L = Vt$ — путь трения скольжения.

Учитывая, что интенсивность и скорость изнашивания связаны соотношением

$$I_{hi}(\alpha, L) = V^{-1} \dot{\Phi}_i(\alpha, L),$$

систему (4.13) можно переписать таким образом:

$$\frac{1}{V} \frac{dh_i(\alpha, t)}{dt} \Phi_i(\tau) = 1 \quad \text{или} \quad \frac{1}{V} \frac{dh_i(\alpha, t)}{dt} = \Phi_i^{-1}(\tau).$$

Установлено, что характеристические функции износостойкости материалов $\Phi(\tau)$ в координатах $\Phi(\tau) \sim \tau$ (рис. 4.8) графически описываются монотонно убывающими S-образными кривыми. Такого вида графические зависимости названы диаграммами износостойкости (изнашивания) материалов. Чем выше значения $\Phi(\tau)$ материала, тем выше его износостойкость и ниже износ, и наоборот [169—171].

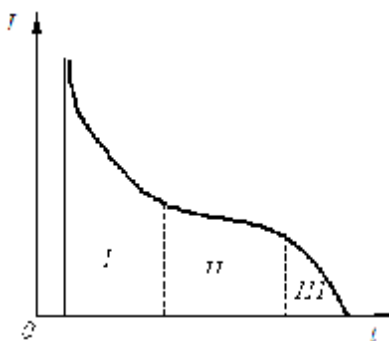


Рисунок 4.8 — Общий вид диаграммы износостойкости материалов

Полная диаграмма износостойкости материалов (см. рис. 4.8), убывая от асимптоты τ , равной $\tau(0)$, стремится к нулю при τ , равной $\tau(b)$. В начале области I наблюдаем износ, обусловленный многоцикловой усталостью. Далее диаграмма износостойкости материалов монотонно убывает, переходя в области III в зону износа, обусловленного малоцикловой усталостью. В предельном случае при $\tau \cong \tau(b)$ разрушение деформируемых приповерхностных объёмов материалов трущейся пары произойдёт путём одноактного среза. Построение предлагаемых диаграмм позволяет проводить сравнительную оценку износостойкости материалов.

Для аппроксимации экспериментальных значений функции $\Phi(\tau)$ можно использовать два вида соотношений [147]:

$$\Phi_i(\tau) = A_i \left[\left(\frac{\tau_i^{(b)} - \tau_i^{(0)}}{\tau - \tau_i^{(0)}} \right)^{m_i} - 1 \right] \quad (4.14)$$

и

$$\Phi_i(\tau) = \frac{B_i}{(\tau - \tau_i^{(0)})^{n_i}}, \quad (4.15)$$

где $\tau_i^{(0)}$ — пороговые значения удельной силы трения, при которых $hi(\alpha, L) \rightarrow 0$;

A_i, B_i — характеристики изнашивания материалов.

Экспериментально установлено [172], что для нормальных условий изнашивания деталей машин можно построить по соотношению (4.15) неполные диаграммы износостойкости материалов, охватывающие области I и II (см. рис. 4.8). Полные могут быть построены по соотношению (4.14) лишь при значениях τ , приближающихся к $\tau(b)$, что для реальных условий работы элементов подвижных сопряжений недопустимо.

Удельная сила трения τ определяется из предположения, что между удельной нагрузкой p и τ существует связь в виде закона Кулона [146; 173]:

$$\tau[\alpha, L, h_i(\alpha, L)] = fp[\alpha, L, h_i(\alpha, L)], \quad (4.16)$$

где f — коэффициент трения.

Удельную силу трения τ определяем по формуле (4.16), приняв

$$p[\alpha, L, h_i(\alpha, L)] = p_0(\alpha) = \text{const.}$$

При исследовании кинетики изнашивания трибосопрежений с неоднородным распределением давлений по области контакта, что имеет место в данной задаче, в уравнение изнашивания вводится максимальное значение давления [146]. Тогда уравнение (4.16) будет таким:

$$\tau[\alpha, L, h_i(\alpha, L)] = fp(\alpha).$$

Учитывая сказанное выше, приходим к следующей системе дифференциальных уравнений:

$$\frac{dh_i(t)}{dt} = \frac{V}{B_i} [fp(\alpha_0) - \tau_i^{(0)}]^{m_i}. \quad (4.17)$$

Для определения долговечности элементов трибопары $t_i(\alpha_0)$ необходимо проинтегрировать выражение (4.17) в пределах $0 \leq h_i \leq h_{i*}$ и $0 \leq t_i \leq t_{i*}$ (t_{i*} — нормативная долговечность, h_{i*} — предельно допустимый износ), используя формулы

$$t_i(\alpha_0) = \frac{h_i}{V} \frac{B_i}{[fp(\alpha_0) - \tau_i^{(0)}]^{m_i}} \quad \text{и} \quad t_i(\alpha_0) = \frac{I_i L_i}{V} \frac{B_i}{[fp(\alpha_0) - \tau_i^{(0)}]^{m_i}},$$

где $L_i = 2\pi R1$ — путь трения для вала [174];

I_i — интенсивность изнашивания вала, которая определяется по выбранной модели для деталей, работающих в условиях фреттинг-коррозии.

Тогда долговечность вала t_i будет определяться по формуле

$$t_i(\alpha_0) = \frac{I_1 2\pi R_1}{V} \frac{B_1}{[fp(\alpha_0) - \tau_i^{(0)}]^{m_1}}.$$

На рисунке 4.9 представлены результаты расчёта долговечности вала (для опорной поверхности, сопряжённой с втулкой подшипника) от максимальной удельной нагрузки, которая зависит от угла контакта, материалов сопряжённых деталей (покрытий). Полученные данные наглядно демонстрируют эффективность применения газотермического напыления композиционных покрытий, обладающих требуемыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами при повышении долговечности крупногабаритных тяжело нагруженных валов, работающих в условиях фреттинг-коррозии. Повышение долговечности таких валов за счёт нанесения покрытий из разработанных композиций в диапазоне удельных нагрузок 8...64 МПа составляет порядка 50% по сравнению с неупрочнёнными валами.

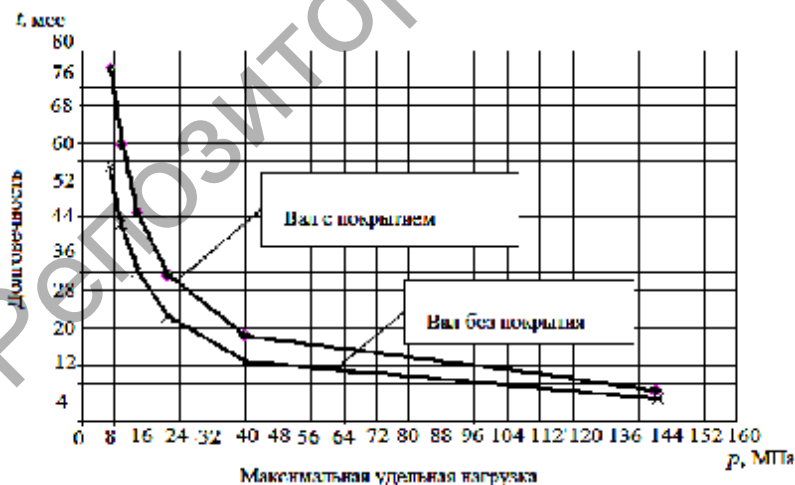


Рисунок 4.9 — Зависимость долговечности вала от максимальной удельной нагрузки

Таким образом, из проведённых исследований и расчётов следует, что предложенный подход позволяет определять долговечность или износ деталей, трущихся при различных видах трения скольжения.

4.5 Разработка типового технологического процесса и внедрение результатов работы в промышленность

Достигнутый уровень физико-механических и эксплуатационных свойств газотермических покрытий из разработанных композиций позволяет использовать их для упрочнения/восстановления деталей пар трения, работающих в условиях фреттинг-коррозии, широком диапазоне удельных нагрузок и скоростей скольжения. На способность покрытий выдерживать в процессе изнашивания определённые силовые воздействия влияют характер приложения нагрузки, а также форма и жёсткость детали.

Технологический процесс нанесения покрытий включает подготовку порошкового материала, детали и собственно нанесение покрытия. Перед напылением порошок просеивают через набор сит и выдерживают в сушильном шкафу при температуре 250...260°C в течение 5...6 часов, перед напылением производят подготовку поверхности и нагревают напыляемую поверхность газовой горелкой до температуры 70...90°C. Кроме того, по предложенной технологии производится плазменное напыление подслоя из термореагирующего порошка ПТ-НА-01, затем наносится основная часть газотермического покрытия из разработанной композиции газопламенным напылением. Данная технология позволяет исключить недопустимый перегрев напыляемой детали, снизить уровень остаточных напряжений и уменьшить вероятность усталостного разрушения детали. Исключение из технологического процесса затрат времени, связанных с переналадкой плазменной установки, позволит напылять основной слой на достаточно разогретую поверхность, также это позволит не допустить образования оксидных плёнок значительной толщины.

Режимы подготовки поверхности приняты с учётом исследований, проведённых в разделе 3.3 главы 3. Режимы обработки и геометрия режущего инструмента со вставкой из гексаниа обеспечивают параметры шероховатости исходной поверхности, обуславливающие максимальную прочность сцепления покрытия с основой (углеродистая сталь): скорость резания V , равная 7 м / мин; подача S , равная 0,75 мм / об, радиус при вершине резца $R_{в.р.}$, равный 0,2 мм, глубина резания t , равная 0,4...0,7 мм; главный и вспомогательный углы в плане ϕ , равный 40°; ϕ_1 , равный 20°; γ , равный -5°.

Технологические параметры плазменного напыления с учётом проведённых экспериментальных исследований приняты в соответствии с разделом 3.4 главы 3: сила тока дуги — 240...250 А; напряжение — 80...85 В; дистанция напыления — 170...180 мм; расход плазмообразующего газа — 3,0...3,5 м³ / ч; расход порошка — 1,5...2,5 кг / ч.

При напылении основной части ГТП из композиций № 1 и № 2, исходя из проведённых экспериментальных исследований (раздел 3.5 главы 3), принимаем дистанцию напыления L , равную 200 мм; расход горючего газа МАФ — 1,0...1,2 м³ / ч; расход кислорода — 4,5...5,0 м³ / ч; расход воздуха — 0,2 м³ / ч. Рекомендуемая толщина покрытия, напыляемая за один ход горелки, h_x , равна 0,25 мм. Коэффициент α , учитывающий величину дистанции напыления, равен $20 \cdot 10^{-3} \text{ л} / \text{мм}^2$.

На Слонимском картонно-бумажном заводе «Альбертин» была внедрена технология упрочнения/восстановления валов бумагоделательного оборудования.

Обработка производилась на токарно-винторезном станке модели К-166 с применением установки плазменного напыления УПУ-3Д и газопламенной установки ТРУ-БПИ.

Пример. Расчёт параметров технологического процесса упрочнения/восстановления газотермическим напылением тяжело нагруженных валов бумагоделательного оборудования.

Определение параметров подготовки поверхности перед напылением

Режимы обработки и геометрия режущего инструмента со вставкой из гексanita, обеспечивающие параметры шероховатости исходной поверхности, обуславливающие максимальную прочность сцепления покрытия с основой (углеродистая сталь):

Исходные данные:

скорость резания, V , м / мин:	7;
Подача, S , мм / об:	0,75;
радиус при вершине резца, $R_{в.р}$, мм:	0,2;
глубина резания, t , мм:	0,4...0,7;
главный и вспомогательный углы в плане, φ , φ_1 , γ :	40°; 20°; -5° соответственно

Рассчитаем необходимую частоту вращения n заготовки по формуле

$$n = \frac{1000 v}{\pi d} \text{ мин}^{-1},$$

где d — диаметр обрабатываемой поверхности, мм:

$$n = \frac{1000 \cdot 7}{\pi 120} = 19 \text{ мин}^{-1},$$

в соответствии с паспортными данными применяемого оборудования (токарный станок модели К-166) принимаем n , равной 19 мин^{-1} , тогда скорость резания определяется по формуле

$$v = \frac{\pi d n}{1000} = \frac{\pi 120 \cdot 19}{1000} = 7,16 \text{ м / мин.}$$

Определим параметры напыляемого слоя. Минимальная толщина $H_{n_{\min}}$ наносимого покрытия вычисляется по формуле

$$H_{n_{\min}} = t_{n_{\min}} + z_{\text{обр}_{\min}} + |\rho + \rho' + \varepsilon_v| + \Delta,$$

где $t_{n_{\min}}$ — минимальная рабочая толщина покрытия, мм;

$z_{\text{обр}_{\min}}$ — минимальный припуск на последующую механическую обработку покрытия, равный $2 \cdot 0,75$ мм;

ρ — пространственные отклонения расположения напыляемой поверхности относительно базовых поверхностей заготовки, равные 0,05 мм;

- ρ' — пространственные отклонения расположения поверхности, возникающие в процессе нанесения покрытия, равные $0,2 t_{n\min}$, мм;
- ϵ_v — погрешность установки, равная 0 при сохранении постоянства баз при напылении;
- Δ — толщина переходного слоя (подслоя) между основным металлом и материалом покрытия, равная 0,15 мм.
- Минимальная рабочая толщина покрытия $t_{n\min}$ определяется по формуле

$$t_{n\min} = t_{n.n} + T_{\text{изн}},$$

- где $t_{n.n}$ — толщина покрытия, необходимая для обеспечения нормального функционирования вала БДМ, равная 0,5 мм;
- $T_{\text{изн}}$ — допуск на изнашивание покрытия, исходя из условий эксплуатации валов БДМ, равный 0,5 мм.

Таким образом, минимальная рабочая толщина покрытия составит

$$t_{n\min} = 0,5 + 0,5 = 1 \text{ мм.}$$

Пространственные отклонения расположения поверхности ρ' , возникающие в процессе нанесения покрытия, составят

$$\rho' = 0,2 \cdot 1 = 0,2 \text{ мм.}$$

Минимальная толщина напыляемого покрытия $H_{n\min}$ вычисляется по формуле

$$H_{n\min} = 1 + 0,75 + |0,05 + 0,2 + 0| + 0,15 = 2,15 \text{ мм.}$$

Максимальная толщина покрытия $H_{n\max}$ определяется по формуле

$$H_{n\max} = t_{n\max} + z_{\text{обр}\max} + |\rho + \rho' + \epsilon_v| + \Delta,$$

- где $z_{\text{обр}\max}$ — максимальный припуск на последующую механическую обработку покрытия, мм, вычисляемый по формуле

$$z_{\text{обр}\max} = z_{\text{обр}\min} + T_{\text{п}},$$

- где $T_{\text{п}}$ — допуск на толщину напыляемого покрытия, равный 0,260 мм.
- Таким образом, максимальный припуск на последующую обработку составит $z_{\text{обр}\max} = 0,75 + 0,26 = 1,01 \text{ мм.}$

Максимальная толщина напыляемого покрытия определяется по формуле

$$H_{\text{н max}} = 1 + 1,01 + |0,05 + 0,2 + 0| + 0,15 = 2,41 \text{ мм.}$$

Технологические параметры плазменного напыления с учётом проведённых экспериментальных исследований приняты в соответствии с разделом 3.3 главы 3: сила тока дуги — 240...250 А; напряжение — 80...85 В; дистанция напыления — 170...180 мм; расход плазмообразующего газа — 3,0...3,5 м³/ч; расход порошка — 1,5...2,5 кг/ч.

Определение параметров газоплазменного напыления основной части газотермического покрытия

При напылении основной части ГТП из композиций № 1 и № 2, исходя из проведённых экспериментальных исследований (раздел 3.4 главы 3), принимаем дистанцию напыления L , равной 200 мм, расход горючего газа МАФ — 1,0...1,2 м³/ч, расход кислорода — 4,5...5,0 м³/ч, расход воздуха — 0,2 м³/ч. Рекомендуемая толщина покрытия, напыляемая за один ход горелки h_x , равна 0,25 мм. Коэффициент α , учитывающий величину дистанции напыления, равен $20 \cdot 10^{-3} \text{ л / мм}^2$.

Расчёт подачи S , мм / об (мм / ход), горелки или заготовки осуществляется по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\ln 2}{\alpha}},$$

где α — коэффициент, зависящий от дистанции напыления, равный $20 \cdot 10^{-3} \text{ л / мм}^2$;

$$S = \sqrt{\frac{\ln 2}{20 \cdot 10^{-3}}} \approx 6 \text{ мм / об.}$$

Частота вращения цилиндрической заготовки, (n , мин⁻¹), при напылении определяется по формуле

$$n = \frac{G}{60 \rho h_x \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \left(R + \frac{h_x}{2} \right) 2\pi},$$

где R — радиус заготовки, мм.

$$n = \frac{6}{60 \cdot 7300 \cdot 10^{-9} \cdot 0,25 \sqrt{\frac{\pi}{20 \cdot 10^{-3}}} \left(60 + \frac{0,25}{2} \right) 2\pi} = 11,58 \text{ мин}^{-1}.$$

Принимаем частоту n равную $9,5 \text{ мин}^{-1}$ в соответствии с паспортными данными станка.

$$\text{Тогда скорость вращения заготовки } v = \frac{\pi 120 \cdot 9,5}{1000} = 3,58 \text{ м / мин.}$$

Расчёт массы порошкового материала M , кг, необходимого для напыления, выполняется по формуле

$$M = 1,2 F h_n \rho,$$

где F — площадь напыляемой поверхности, м^2 ;

h_n — толщина покрытия, равная $2,15 \text{ мм}$.

$$F = 2 \pi 60 \cdot 260 \cdot 10^{-6} = 0,098 \text{ м}^2.$$

$$M = 1,2 \cdot 0,098 \cdot 2,15 \cdot 10^{-3} \cdot 7300 = 1,85 \text{ кг.}$$

Определяем количество K рабочих ходов горелки для обеспечения заданной толщины покрытия по формуле

$$K = \frac{H_{\text{нmin}}}{h_x} = \frac{2,15}{0,25} = 8,43.$$

Принимаем K равным 9.

Определение технических норм времени

Технические нормы времени в условиях серийного производств устанавливаются расчётно-аналитическим методом с помощью литературного источника по формулам

$$T_{\text{шт.-к}} = T_{\text{шт}} + \frac{T_{\text{п.-з}}}{n},$$

$$T_{\text{шт}} = T_{\text{осн}} + T_{\text{всп}} + T_{\text{общ}} + T_{\text{отд}},$$

где $T_{\text{п.-з}}$ — подготовительно-заключительное время, мин;

$T_{\text{осн}}$ — основное время, мин;

$T_{\text{всп}}$ — вспомогательное время, мин;

$T_{\text{общ}}$ — общее время на обслуживание и отдых, мин;

n — количество деталей в настроенной партии, равное 5 шт.;

$$T_{\text{общ}} = T_{\text{оп}} \frac{\Pi_{\text{общ}}}{100},$$

где $T_{\text{оп}}$ — оперативное время, мин;

$\Pi_{\text{общ}}$ — общие затраты времени на обслуживание и отдых, равные 4%;

$$T_{\text{оп}} = T_{\text{осн}} + T_{\text{всп}},$$

$$T_{\text{всп}} = (T_{\text{уст. и сн}} + T_{\text{закр. и откр}}) + (T_{\text{упр}} + T_{\text{изм}}),$$

где $T_{\text{уст. и сн}}$ — время на установку и снятие заготовки, мин;
 $T_{\text{закр. и откр}}$ — время на закрепление и открепление заготовки, мин;
 $T_{\text{упр}}$ — время на приёмы управления станком, мин;
 $T_{\text{изм}}$ — время на измерение, мин;
 $(T_{\text{уст. и сн}} + T_{\text{закр. и откр}}) = 0,08 + 0,024 = 0,104$ мин;
 $(T_{\text{упр}} + T_{\text{изм}}) = (0,01 + 0,04 + 0,035) + \frac{0,09 \cdot 20}{100} = 0,103$ мин;

$$T_{\text{всп}} = 0,104 + 0,103 = 0,207 \text{ мин};$$

$$T_{\text{осн}} = 13,87 \text{ мин};$$

$$T_{\text{оп}} = 13,87 + (0,207) \cdot 1,85 = 14,25 \text{ мин};$$

$$T_{\text{общ}} = 14,25 \cdot 0,04 = 0,57 \text{ мин};$$

$$T_{\text{п-3}} = 8 \text{ мин}; T_{\text{шт.-к}} = 14,25 + 8/5 = 15,85 \text{ мин}.$$

Определим норму времени $T_{\text{шт.-к}}$ на газопламенное напыление по формуле

$$T_{\text{шт.-к}} = T_{\text{н}} + T_{\text{доп}} + \frac{T_{\text{п-3}}}{n},$$

где $T_{\text{н}}$ — время напыления, мин;

$$T_{\text{н}} = \frac{L}{S n} = \frac{265}{6 \cdot 9,5} = 4,65 \text{ мин}.$$

$T_{\text{всп}}$ — вспомогательное время, мин;

$T_{\text{доп}}$ — дополнительное время, мин;

$T_{\text{п-3}}$ — подготовительно-заключительное время, мин;

n — размер партии, шт.

Вспомогательное время $T_{\text{всп}}$ вычислим по формуле

$$T_{\text{всп}} = T_{\text{всп1}} + T_{\text{всп2}},$$

где $T_{\text{всп1}}$ — время на установку и снятие заготовки, равное 14 мин;

$T_{\text{всп2}}$ — вспомогательное время, связанное с напылением, мин.

Рекомендуется $T_{\text{всп2}} \approx 0,05$ мин за один проход.

$$T_{\text{всп2}} = 0,05 \cdot 9 = 0,45 \text{ мин};$$

$$T_{\text{всп1}} = 0,45 + 14 = 14,45 \text{ мин}.$$

Дополнительное время $T_{\text{доп}}$ включает наблюдение за работой установки, время перерывов на отдых и личные надобности, подготовку напыляемого порошка, замену сопла по мере износа, периодическую очистку наконечника от частиц металла, очистку и смазку станка в процессе работы.

$$T_{\text{доп}} = 0,15 \cdot T_{\text{осн}},$$

$$T_{\text{оп}} = t_{\text{отд}} + T_{\text{всп}},$$

$$T_{\text{доп}} = 0,15 (4,65 + 14,45) = 2,87 \text{ мин.}$$

В соответствии с рекомендациями принимаем $T_{\text{п.-з}}$, равным 20 мин, количество заготовок в партии равным 5 шт., получим следующие данные:

$$T_{\text{шт.-к}} = 4,65 + 14,45 + 2,87 + \frac{20}{5} = 25,97 \text{ мин.}$$

Режимы для операции механической обработки были выбраны в соответствии с рекомендациями.

Были изготовлены образцы деталей с покрытиями в количестве четырёх штук по разработанной технологии упрочнения и проведены предварительные испытания. По результатам испытаний была определена прочность сцепления покрытий с основой (60...65 МПа), пористость (4...6%) при производительности 7,0...7,5 кг / ч и коэффициенте использования материала 90...95%. На основании полученных данных были уточнены режимы обработки и разработан технологический процесс упрочнения/восстановления тяжело нагруженных валов бумагоделательного оборудования.

По разработанному технологическому процессу были упрочнены валы на ОАО Слонимский картонно-бумажный завод «Альбертин» и ОАО «Светлогорский ЦКК». В результате годовой экономический эффект составил 44 170 791,2 р. в ценах на 2008 год.

Пример. Расчёт годового экономического эффекта от внедрения технологии упрочнения/восстановления валов бумагоделательного оборудования
Годовой экономический эффект \mathcal{E} определяется по следующим формулам:

$$\mathcal{E} = Z_1 - Z_2,$$

где Z_1 — годовые затраты на приобретение новых валов, р.;

Z_2 — годовые затраты, связанные с процессом упрочнения/восстановления изношенных валов, р.,

и

$$Z_1 = НС,$$

где $Н$ — количество валов, необходимых для технологических нужд в год (12 шт.);

$С$ — усреднённая стоимость нового вала (включает стоимость валов массой 1 900...4 810 кг), равная 12 203 350 р.

$$Z_1 = 12\,203\,350 \cdot 4 = 48\,813\,400 \text{ р.}$$

Годовые затраты, связанные с процессом упрочнения/восстановления изношенных валов, определяются по формуле

$$Z_2 = H(C_G + C_M + C_3 + C_{3,\text{пл}} + C_{н,\text{р}}),$$

где C_G , C_M , C_3 , $C_{3,\text{пл}}$, $C_{н,\text{р}}$ — стоимость затрачиваемых газов (табл. 4.1), материалов (табл. 4.2), электроэнергии, заработная плата обслуживающего персонала, накладные расходы.

Зарплата обслуживающего персонала вычисляется по формуле

$$C_{3,\text{пл}} = t_k R,$$

где t_k — трудоёмкость процесса упрочнения/восстановления вала, ч;

R — тарифная ставка рабочего, р.

$$C_{3,\text{пл}} = 240\,000 \cdot 66,82/60 = 267\,400 \text{ р.}$$

Т а б л и ц а 4.1 — Стоимость используемых газов, C_G

Газ	Требуемый объём, м ³	Цена 1 м ³ , тыс. р.	Стоимость, тыс. р.
Азот	0,29	4,62	1,3398
МАФ	0,52	13,10	6,8120
Кислород	3,00	1,50	4,5000
Итого			12,6518

Т а б л и ц а 4.2 — Стоимость напыляемых материалов, C_M

Напыляемый материал	Марка	Масса, кг	Цена 1 кг, тыс. р.	Стоимость, тыс. р.
Композиция № 1 + подслои	ПТ-НА-01	0,73	81,184	59,26432
	ПР-Х4Г2Р4С2Ф	0,6	120,832	72,49920
	ПР-НД42СР	0,67	109,976	73,68392
	Итого	2,0	311,992	205,44740
Композиция № 2 + подслои	ПТ-НА-01	0,52	81,184	42,21568
	ПГ-19М-01	0,77	42,244	32,52788
	ПР-Х4Г2Р4С2Ф	0,73	120,832	88,20736
	Итого	2,02	244,260	162,95090

Стоимость электроэнергии C_3 вычисляется по формуле

$$C_3 = Pa_3,$$

где P — энергоёмкость операций, кВт · ч;

a_3 — стоимость 1 кВт · ч электроэнергии, р.

$$C_3 = 33,425 \cdot 214 = 7\,153 \text{ р.}$$

Накладные расходы $C_{н.р}$ определяются по формуле

$$C_{н.р} = \beta C_{з.пл},$$

где β — коэффициент, принимаемый при выполнении операций упрочнения/восстановления, равный 2...2,5.

$$C_{н.р} = 2,5 \cdot 267\,400 = 668\,500 \text{ р.}$$

$$Z_2 = 4 (12\,651,8 + 205\,447,4 + 7\,153 + 267\,400 + 668\,000) = 4\,642\,608,8 \text{ р.}$$

Годовой экономический эффект \mathcal{E} от внедрения технологии восстановления/упрочнения составит сумму, определяемую по формуле

$$\mathcal{E} = Z_1 - Z_2 = 48\,813\,400 - 4\,642\,608,8 = 44\,170\,791,2 \text{ р.,}$$

или на один вал — 11 042 697,8 р.

Выводы

1. Интенсивность изнашивания при фреттинг-коррозии покрытий из разработанных композиций во всем диапазоне удельных нагрузок ниже в 1,6...2,3 раза, чем стали 45, закалённой до 40...43 HRC.

2. Интенсивность изнашивания при фреттинг-коррозии в зависимости от амплитуды колебаний покрытий из композиции № 1 в 1,3...1,6 раза, а из композиции № 2 — в 1,6...2,0 раза ниже, чем образцов из стали 45. Износ в исследуемом диапазоне значений, независимо от природы материалов, прямо пропорционален величине амплитуды колебаний.

3. Интенсивность разрушения при фреттинг-коррозии в зависимости от частоты колебаний покрытия из композиции № 1 на 20% меньше, чем стали 45, а покрытие из композиции № 2 более чем в 2 раза ниже по сравнению со сталью 45. Интенсивность изнашивания значительно снижается с увеличением частоты колебаний, после увеличения её значения свыше 25 Гц процесс изнашивания стабилизируется, независимо от типа материала.

4. Интенсивность изнашивания при фреттинг-коррозии с увеличением числа циклов нагружения возрастает. Интенсивность процесса изнашивания разработанных покрытий в 1,2...1,5 раза ниже по сравнению со сталью 45.

5. Результаты экспериментов адекватны выдвинутой модели изнашивания газотермических покрытий при фреттинг-коррозии.

6. Изнашивание при трении скольжения покрытий из разработанных композиций во всём диапазоне удельных нагрузок (10...40 МПа) и скоростей скольжения (0,5...3,5 м/с) значительно ниже, чем стали 45, закалённой до 40...43 HRC (для композиции № 1 в — 1,3...1,5 раза, для композиции № 2 — в 1,5...2,0 раза). Процесс изнашивания протекает плавно во всём диапазоне скоростей скольжения, что свидетельствует об отсутствии схватывания. Коэффициент трения у композиционных покрытий сравнительно низок, и в диапазоне относительных скоростей скольжения 0,5...3,5 м/с он не превышает 0,12.

7. Высокая износостойкость и низкий коэффициент трения (0,06...0,12) композиционных материалов определяются особенностями структуры этих покрытий: пластичной матрицей с распределёнными мелкодисперсными твёрдыми включениями. Матрица покрытий обладает высокими антифрикционными свойствами, а твёрдые включения воспринимают основную нагрузку.

8. Проведённые эксперименты позволяют рекомендовать разработанные композиции для повышения долговечности деталей машин и оборудования, работающих в условиях фреттинг-коррозии и высоких удельных нагрузок, так как они обладают высокой износостойкостью, сравнимой с оплавленным покрытием из сплава ПГ-СР4.

9. Разработана модель для определения долговечности валов, позволяющая оценить эффективность применения упрочнения опорных поверхностей тяжело нагруженных валов БДМ газотермическим напылением покрытий. Применение разработанных композиций при упрочнении таких валов повысило их долговечность в 1,5...2,0 раза.

10. Разработана и внедрена (на ОАО «Слонимский картонно-бумажный комбинат» и ОАО «Светлогорский ЦКК») технология упрочнения опорных поверхностей тяжело нагруженных валов БДМ, основанная на проведённых теоретических и экспериментальных исследованиях. Годовой экономический эффект при упрочнении валов по разработанной технологии составил 44 млн р.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ условий работы валов БДМ позволил выявить закономерность изменения удельной нагрузки в процессе эксплуатации и разработать методику определения максимальной удельной нагрузки, учитывающую деформацию и изнашивание элементов сопряжения «опорная поверхность вала — втулка подшипника», приводящих к уменьшению площади контакта. На основе разработанной методики определена максимальная удельная нагрузка для валов массой 2...4 т с диаметром шейки 80...150 мм при угле контакта 10° — 26...42 МПа, что позволяет определить требования к разрабатываемым композициям и технологии их нанесения для обеспечения необходимой прочности сцепления покрытия с основой [6; 7; 157].

2. В результате экспериментальных исследований установлены зависимости прочности сцепления покрытий с основой и их износостойкости от состава композиций для напыления и разработаны математические модели, позволившие определить оптимальные составы композиций (композиция № 1: 30,9% ПТ-НА-01 + 32,7% ПР-Х4Г2Р4С2Ф + 36,4% ПР-НД42СР; композиция № 2: 18,9% ПТ-НА-01 + 41,4% ПГ-19М-01 + 39,7% ПР-Х4Г2Р4С2Ф). Покрытия из полученных композиций обладают высокой прочностью сцепления с основой (55...65 МПа) и износостойкостью не менее 0,1 ч / мкм [148—150; 152; 157; 159; 165].

3. Установлены зависимости влияния параметров подготовки поверхности (нарезания резьбы, плазменного напыления подслоя) на прочность сцепления покрытия с основой. Разработанная математическая модель зависимости прочности сцепления покрытия с основой от параметров шероховатости поверхности (Ra , Rp , $Rmax$) позволила определить их значения (Ra — 40 мкм; Rp — 80 мкм; $Rmax$ — 100 мкм), обеспечившие высокую прочность сцепления (≈ 65 МПа). Экспериментально установлена зависимость прочности сцепления покрытий из разработанных композиций от толщины подслоя из термореагирующего материала. Максимальная прочность сцепления покрытий с основой достигается при толщине 150...200 мкм для композиции № 1 и 100...150 мкм для композиции № 2 за счёт снижения уровня остаточных напряжений до 3 раз [148; 151—153; 157—159; 165; 182; 183].

4. На основании установленных экспериментальных зависимостей влияния расходов газов (МАФ, кислорода, воздуха) при газопламенном напылении на прочность сцепления покрытия с основой разработана математическая модель, позволившая определить оптимальные параметры (расход МАФ — 1,0...1,2 м³/ч, расход кислорода — 4,0...4,5 м³/ч, расход воздуха — 0,2 м³/ч), обеспечи-

вающие максимальную прочность сцепления (66,8 МПа). Установлено, что на прочность сцепления покрытия отрицательно влияет увеличение расхода транспортирующего газа вследствие интенсивного охлаждения газового пламени и увеличения его окислительной способности. Расходы газов, образующих горючую смесь, имеют положительную корреляцию с прочностью сцепления и практически одинаково влияют на значение последней [152; 153; 157; 177; 178; 183].

5. В результате исследований изнашивания при фреттинг-коррозии полученных покрытий установлено, что разработанные композиции имеют износостойкость в 1,5...2,0 раза выше по сравнению со сталью 45 и сопоставимую с износостойкостью оплавленного самофлюсующегося сплава ПГ-СР4 во всём диапазоне удельных нагрузок, количества циклов нагружения, амплитуды и частоты колебаний. Результаты экспериментов соответствуют выбранной модели изнашивания газотермических покрытий при фреттинг-коррозии. Установлено, что износостойкость в условиях граничного трения покрытий из разработанных композиций во всём диапазоне удельных нагрузок (10...40 МПа) и скоростей скольжения (0,5...3,5 м/с) в 1,3...2,3 раза выше, чем стали 45, закалённой до 40...43 HRC, и сопоставима с износостойкостью оплавленного самофлюсующегося сплава ПГ-СР4. Процесс изнашивания протекает плавно во всем диапазоне скоростей скольжения, что свидетельствует об отсутствии схватывания. Коэффициент трения у композиционных покрытий сравнительно низок и в диапазоне относительных скоростей скольжения 0,5...3,5 м/с не превышает 0,12. Высокая износостойкость может быть объяснена композиционным характером структуры разработанных покрытий [6; 8; 148; 151; 157; 158; 165; 175; 176; 179].

6. Рентгеноспектральным анализом установлено, что диффузионная зона отдельных участков на границе «покрытие—основа» достигает 10...25 мкм, что обеспечивает высокую прочность сцепления всего покрытия (65...75 МПа). На основании исследования структуры, микротвёрдости, пористости и химического состава полученных покрытий установлено, что разработанная технология упрочнения тяжело нагруженных деталей обеспечивает высокий уровень физико-механических свойств за счёт структуры покрытий, которая соответствует правилу Шарпи, высокой микротвёрдости как основы (до 7 500 МПа), так и отдельных фаз (до 10 000 МПа), невысокой пористости (менее 5%) [6; 8; 148; 153; 157; 180; 181; 183].

7. На основании полученных результатов исследований разработана и внедрена в производство технология упрочнения/восстановления газотермическим напылением валов БДМ. Применение плазменного напыления подслоя, газопламенного напыления основной части ГТП из разработанных композиций позволило получить высокую прочность сцепления (65...75 МПа) за счёт обеспечения минимального промежутка времени между операциями напыления. Это снижает вероятность образования сплошной окисной плёнки и не приводит к недопустимому перегреву напыляемой поверхности.

8. Методика определения максимальной удельной нагрузки, действующей на опорную поверхность вала, даёт возможность оценить её величину и сделать вывод о возможности применения технологий упрочнения/восстановления

для каждого типоразмера вала с позиции обеспечения работоспособности вала с покрытием (величина удельной нагрузки не должна превышать прочность сцепления покрытия с основой) [6; 7; 157].

9. Разработана модель для определения долговечности валов, позволяющая оценить эффективность применения упрочнения опорных поверхностей тяжело нагруженных валов БДМ газотермическим напылением покрытий. Применение разработанных композиций при упрочнении валов повысило их долговечность в 1,5...2,0 раза. Годовой эффект от внедрения технологии составил 44 млн р. [6; 7; 151; 157].

Репозиторий БарГУ

РЕЗЮМЕ

Целью работы является повышение эксплуатационных свойств опорных поверхностей высоконагруженных валов, работающих в условиях фреттинг-коррозии, газотермическим напылением композиционных покрытий на примере валов бумагоделательной машины.

При выполнении работы использован современный математический аппарат: пакет математических программ MathCAD, статистическая система Statistica 6.0 и др. Для достижения поставленной цели в качестве специальных методов исследования применены математическое моделирование, металлографические исследования, рентгеноструктурный анализ, исследование износостойкости покрытий на машинах трения и на установке для испытания на фреттинг-коррозию, исследование прочности сцепления полученных покрытий с основным металлом.

Получены математические модели влияния параметров шероховатости поверхности и технологических параметров напыления на прочность сцепления покрытия с основой. Разработаны составы композиции для напыления. В результате исследования их влияния на прочность сцепления и износостойкость покрытий получены математические модели, позволившие оптимизировать составы композиций, обеспечивающие максимальную прочность сцепления (до 70 МПа) при высокой износостойкости (0,1 ч / мкм). Проведённые экспериментальные исследования износостойкости полученных покрытий при трении скольжения позволили выявить закономерности изнашивания полученных композиционных покрытий в зависимости от изменения скорости скольжения и удельной нагрузки. Износостойкость покрытий из разработанных композиций превышает износостойкость закаленной стали 45 в 1,7...3,0 раза. Результаты экспериментальных исследований и производственных испытаний подтвердили эффективность использования разработанных композиций при упрочнении деталей, подверженных фреттинг-коррозии и воздействию высоких удельных нагрузок.

Разработан и внедрён технологический процесс упрочнения валов бумагоделательного оборудования. В результате износостойкость упрочнённых деталей увеличилась в 1,56...1,93 раза, прочность сцепления — 65...75 МПа, пористость покрытий — 3...5%, коэффициент использования материала — 90...95%, производительность — 7,0...7,5 кг / ч.

РЭЗЮМЭ

Мэтай работы з'яўляецца павышэнне эксплуатацыйных якасцей апорных паверхняў высоканагружаных валоў, якія працуюць ва ўмовах фрэтынг-карозіі, газатэрмічным напыленнем кампазіцыйных пакрыццяў на прыкладзе валоў папяровай машыны.

Пры выкананні работы выкарыстоўваўся сучасны матэматычны апарат: пакет матэматычных праграм MathCAD, статыстычная сістэма Statistica 6.0 і інш. Для дасягнення пастаўленай мэты ў якасці спецыяльных метадаў даследавання былі скарыстаны наступныя: матэматычнае мадэліраванне, металаграфічныя даследаванні, рэнтгенаструктурны аналіз, даследаванне зносаўстойлівасці пакрыццяў на машынах трэння і на ўстаноўцы для выпрабавання на фрэтынг-карозію, даследаванне трываласці счাপлення атрыманых пакрыццяў з асноўным металам.

Атрыманы матэматычныя мадэлі ўплыву параметраў шурпатаці паверхні і тэхналагічных параметраў напылення на трываласць счাপлення пакрыцця з асновай. Распрацаваны саставы кампазіцыі для напылення. У выніку даследавання іх уплыву на трываласць счাপлення і зносаўстойлівасць пакрыццяў атрыманы матэматычныя мадэлі, якія дазволілі аптымізаваць саставы кампазіцый, што забяспечваюць максімальную трываласць счاپлення (да 70 МПа) пры высокай зносаўстойлівасці (0,1 г/мкм). Праведзеныя эксперыментальныя даследаванні зносаўстойлівасці атрыманых пакрыццяў пры трэнні слізгання дазволілі выявіць заканамернасці зношвання атрыманых кампазіцыйных пакрыццяў у залежнасці ад змянення хуткасці слізгання і ўдзельнай нагрузкі. Зносаўстойлівасць пакрыццяў з распрацаваных кампазіцый перавышае зносаўстойлівасць загартаванай сталі 45 у 1,7...3,0 разы. Вынікі эксперыментальных даследаванняў і вытворчых выпрабаванняў пацвердзілі эфектыўнасць выкарыстання распрацаваных кампазіцый пры ўмацаванні дэталей, схільных да фрэтынг-карозіі і ўздзеяння высокіх удзельных нагрузкаў.

Распрацаваны і ўкаранены тэхналагічны працэс умацавання валоў папяровага абсталявання. У выніку зносаўстойлівасць умацаваных дэталей павялічылася ў 1,56...1,93 раза, трываласць счاپлення — 65...75 МПа, порыстасць пакрыццяў — 3...5%, каэфіцыент выкарыстання матэрыялу — 90...95%, прадукцыйнасць — 7,0...7,5 кг / г.

SUMMARY

The purpose of the work is to raise the performance characteristics of the high-loaded shafts seating operating under the conditions of fretting-corrosion by using the gas-thermal sputtering of composite coatings on the example of a papermaking machine.

In carrying out this work, a modern mathematical tool was used: a MathCAD software package, Statistica 6.0 statistical system, etc. To fulfill the purpose of the work, mathematical simulation, metallographic analysis, X-ray diffraction analysis, the analysis of the coating wearing capacity and cohesive resistance were used are special methods of research.

Mathematical models of the influence of the surface roughness parameters and of the sputtering technological parameters on the adhesion of the coating with the basis. The compositions for sputtering have been worked out as a result of the investigation of their influence on the adhesion and wearing capacity of the coatings. A mathematical model was obtained that made it possible to at optimize the composition of the compounds that ensure the highest possible adhesion (up to 70 MPa) at the top wearing capacity (0.1 h / mm). The experimental investigation of the wearing capacity of the coatings obtained at sliding friction has made possible reveal the regularities of the wearing out of such coatings the slip velocity and specific load. Wearing capacity of the coatings worked out is 1.7...3.0 times higher than those from the hardened steel. The results of experimental investigation that and production tests have confirmed the efficiency of the worked-out composition provide strengthening of fretting-wear components.

A technological process of the papermaking shafts equipment strengthening has been worked out and introduced. As a result, the wearing capacity of the strengthened components has increased 1.56...1.93 times, the adhesion — 65...70 MPa, the coatings porosity — 3...5%, material utilization — 90...95% and the efficiency — 7.0...7.5 kg / h.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Эйдлин, И. Я.* Бумагоделательные и отделочные машины / И. Я. Эйдлин. — 3-е изд., испр. и доп. — М. : Лесн. пром-сть, 1970. — 624 с.
2. *Ястребова, С. Ю.* Бумага [Электронный ресурс] / С. Ю. Ястребова // Реферат. — Уссурийск : [б. и.], 2001. — Режим доступа: <http://www.calculate.ru/book—refraper.html>. — Дата доступа: 19.03.2005. — Загл. с экрана.
3. Оборудование для производства картона [Электронный ресурс] / Каталог. — 2003. — Режим доступа: <http://www.kart—mash.ru>. — Дата доступа: 27.12.2007. — Загл. с экрана.
4. Подшипники CARB — лучшее решение для плавающих опор сушильных цилиндров БДМ [Электронный ресурс] / Каталог. — 2003. — Режим доступа: <http://www.pk2000.ru/pub/catalogues/bearings/skf/carb—rus.pdf>. — Дата доступа: 05.11.2007. — Загл. с экрана.
5. *Фляте, Д. М.* Технология бумаги : учеб. для вузов / Д. М. Фляте. — М. : Лесн. пром-сть, 1988. — 440 с.
6. *Спиридонов, Н. В.* Физико-математическая модель изнашивания газотермических покрытий на опорных поверхностях прессовых валов в условиях фреттинг-коррозии / Н. В. Спиридонов, И. О. Соколов, Л. И. Пилецкая // Машиностроение : Респ. межведомств. сб. науч. тр. / под ред. Б. М. Хрусталёва. — Минск : [б. и.], 2007. — Вып. 22. — С. 174—178.
7. Определение максимальной удельной нагрузки в паре «опорная поверхность вала — втулка подшипника» / Н. В. Спиридонов [и др.] // Машиностроение : Респ. межведомств. сб. науч. тр. / под ред. Б. М. Хрусталёва. — Минск : [б. и.], 2007. — Вып. 23. — С. 243—254.
8. *Соколов, И. О.* Физико-математическое моделирование процесса фреттинг-коррозии газотермических покрытий / И. О. Соколов, Н. В. Спиридонов // Вестн. БНТУ. — 2007. — № 1. — С. 26—30.
9. *Голубец, В. М.* Метод расчёта долговечности опор скольжения турбобура ЗТСШ1—195ТЛ / В. М. Голубец, М. В. Чернец // Физико-химическая механика материалов. — 1992. — № 2. — С. 95—98.
10. Труды ГПИ им. А. А. Жданова: Теоретические экспериментальные исследования каландровых батарей БДМ : [в ? т.]. — Горький : [б. и.], 1969. — Т. 25. — Вып. 10. — 50 с.
11. *Hutchings, I. M.* Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials / I. M. Hutchings. — Cambridge : [s. n.], 1992. — p. 273.
12. *Голего, Н. Л.* Фреттинг-коррозия металлов / Н. Л. Голего, А. Я. Алябьев, В. В. Шевеля. — Киев : Техніка, 1974. — 272 с.

13. Tomlinson, G. A. The Rusting of Steel Surfaces in Strength / G. A. Tomlinson // Proceeding of the Royal Society. — London : A, 1927. — Vol. 115. — p. 472.
14. Tomlinson, G. A. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G-journal of Aerospace / G. A. Tomlinson. — 1939. — Vol. 141. — p. 223.
15. Feng, I.-M. Fretting corrosion of mild steel in air and in nitrogen / I.-M. Feng, H. H. Uhlig // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. — 1954. — Vol. 21. — p. 395.
16. Reed, F. E. Trans. Am. Soc. Lubric. Engers / F. E. Reed, J. F. Batter. — Vol. 2. — 1960. — p. 159.
17. Уотерхауз, Р. Б. Фреттинг-коррозия / Р. Б. Уотерхауз ; пер. с англ. под ред. канд. техн. наук Г. Н. Филимонова. — Л. : Машиностроение, 1976. — 272 с.
18. de Gee A. W. J. The wear of sintered aluminium powder (S.A.P.) under conditions of vibrational contact / A. W. J. de Gee, C. P. I. Commissaris, J. H. Zaat // Wear. — 1964. — Vol. 7. — p. 535.
19. Uhlig, H. H. Test Equipment for Evaluating Fretting Corrosion / H. H. Uhlig, W. D. Tierney, A. Mc Clellan // ASTM Special Technical Publication. — 1953. — № 144. — p. 71.
20. Wright, K. H. R. An investigation of fretting corrosion / K. H. R. Wright / Proc. Instn. Mech. Engers. — 1952. — Vol. 1. — В. 3. — p. 556.
21. Алябьев, А. Я. Методы защиты деталей от фреттинг-коррозии / А. Я. Алябьев // Надёжность и долговечность авиационных газотурбинных двигателей. — Киев : Книга. — Вып. 1. — 1971. — С. 58—62.
22. Уотерхауз, Р. Б. Контактная коррозия / Р. Б. Уотерхауз // Усталость металлов. — М. : Ил. — 1961. — С. 109—141.
23. Трение, изнашивание и смазка : справочник : в 2 кн. / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. — М. : Машиностроение, 1978. — Кн. 1. — 400 с.
24. Богданович, Л. Н. Трение и износ в машинах : учеб. для вузов / Л. Н. Богданович, В. Я. Прушак. — Минск : Выш. шк., 1999. — 374 с.
25. Тушинский, Л. И. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий / Л. И. Тушинский, А. П. Плохов. — Новосибирск : Наука, 1986. — 200 с.
26. Влияние лазерной обработки на структуру и триботехнические свойства покрытий из самофлюсующихся сплавов / В. А. Протасевич [и др.] // Повышение износостойкости и усталостной прочности деталей машин обработкой концентрированными потоками энергии : тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. семинара. — М. : ИМАТТТ АН СССР, 1985. — С. 36-37.
27. Основные особенности формирования многокомпонентных газотермических покрытий, обуславливающие физико-механические свойства композиций при напылении / В. И. Копылов [и др.] // Физико-химическая механика материалов. — 1991. — № 1. — С. 65—70.
28. Спиридонов, Н. В. Технологические основы формирования поверхностных слоёв с повышенными эксплуатационными свойствами : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08, 05.02.01 / Н. В. Спиридонов. — Минск : [б. и.], 1989. — 474 с.
29. Кобяков, О. С. Исследование структурных и триботехнических характеристик газотермических покрытий на бронзовой матричной основе, дис-

персно упрочнённых частицами корунда / О. С. Кобяков, А. О. Романовский, А. Н. Королёва // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения : сб. науч. тр. ; под ред. С. А. Астапчика, П. А. Витязя. — Минск : Технопринт ; Новополоцк : ПГУ, 2001. — С. 101—105.

30. *Гаркунов, Д. М.* Триботехника / Д. М. Гаркунов. — М. : Машиностроение, 1985. — 424 с.

31. Рекомендации по ремонту и реконструкции тяжело нагруженных узлов скольжения с использованием композиционных материалов. — Минск : ИТК НАН Беларуси, 2000. — 88 с.

32. *Иващенко, С. А.* Газотермические и вакуумно-плазменные покрытия со специальными свойствами / С. А. Иващенко, И. С. Фролов, Ж. А. Мрочек. — Минск : Технопринт, 2001. — 238 с.

33. *Романова, Т. К.* Определение износостойкости покрытий из порошков быстрорежущих сталей / Т. К. Романова, Д. Л. Кожуро, А. Б. Митрофанова // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения : сб. науч. тр. ; под ред. С. А. Астапчика, П. А. Витязя. — Минск : Технопринт ; Новополоцк : ПГУ, 2001. — С. 323—325.

34. Износостойкость и структура газотермических покрытий из порошков эвтектических сплавов на основе железа / И. Е. Полищук [и др.] // Порошковая металлургия. — 1986. — № 12. — С. 81—85.

35. *Демидов, В. Г.* Свойства и структура покрытий из порошков типа ПГ-СП, полученных плазменным методом / В. Г. Демидов // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1997. — № 8. — С. 26—29.

36. Справочник по триботехнике : в 3 т. / под общ. ред. А. В. Чичинадзе. — М. : Машиностроение, 1989—1992. — Т. 1 : Теоретические основы. — 1989. — 400 с. ; Т. 2 : Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения. — 1990. — 420 с. ; Т. 3 : Триботехника антифрикционных, фрикционных и цепных устройств. Методы и средства триботехнических испытаний. — 1992. — 720 с.

37. Справочник по триботехнике : в 2 т. / под ред. И. В. Крагельского. — М. : Машиностроение, 1989. — Т. 1. — 400 с. ; Т. 2. — 358 с.

38. *Гинберг, А. М.* Износостойкие и антифрикционные покрытия / А. М. Гинберг, А. Ф. Иванов. — М. : Машиностроение, 1982. — 43 с.

39. *Добровольский, А. Г.* Абразивная износостойкость материалов : справ. пособие / А. Г. Добровольский, П. И. Кошеленко. — Киев : Техніка, 1989. — 128 с.

40. *Ворошин, Л. Г.* Влияние структуры защитных покрытий на их износостойкость / Л. Г. Ворошин, Ф. И. Пантелеенко, С. Н. Любецкий // Трение и износ. — 1991. — Т. 12. — № 2. — С. 310—314.

41. Структура и свойства боросодержащих порошковых покрытий, полученных методом газотермического напыления / М. Д. Егоров [и др.] // Состояние, перспективы развития и применение упрочняющих покрытий в машиностроении : тез. докл. конф. — Л. : [б. и.], 1987. — С. 68—70.

42. *Крагельский, И. В.* Трение и износ / И. В. Крагельский. — М. : Машиностроение, 1968. — 480 с.

43. Сравнительная износостойкость твёрдых самофлюсующихся сплавов в различных средах / Н. В. Спиридонов [и др.] // Машиностроение и приборостроение. — Минск : Выш. шк., 1975. — Вып. 7. — С. 53—55.
44. Проблема изнашивания твёрдых тел в аспекте механики : [в ? т.] / А. Ю. Шилинский [и др.] // Трение и износ. — 1986. — Т. 7. — № 4. — С. 3—18.
45. Спиридонов, Н. В. Повышение эксплуатационных характеристик диффузионных боридных слоёв лазерной обработкой : [в ? т.] / Н. В. Спиридонов, О. Г. Девойно // Трение и износ. — 1986. — Т. 7. — № 2. — С. 372—377.
46. Сайфуллин, Р. С. Неорганические композиционные покрытия и материалы / Р. С. Сайфуллин. — М. : Химия, 1982. — 296 с.
47. Груздев, Д. А. Получение композиционных электрохимических покрытий с высоким содержанием дисперсной фазы / Д. А. Груздев, С. С. Клименков // Машиностроение : сб. науч. тр. ; под ред. И. П. Филонова. — Минск : Технопринт, 2001. — Вып. 17. — С. 106—110.
48. Борисов, Ю. С. Плазменные порошковые покрытия / Ю. С. Борисов, А. Л. Борисова. — Киев : Наук. думка, 1985. — 321 с.
49. Спиридонов, Н. В. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н. В. Спиридонов, О. С. Кобяков, И. Л. Куприянов ; под ред. В. Н. Чачина. — Минск : Выш. шк., 1988. — 155 с.
50. Восстановление и упрочнение деталей машин с помощью новых износостойких материалов : Обзорная информация. — М. : АгроНИИТЭИИТО, 1990. — 64 с.
51. Получение и структура газотермических покрытий на основе Ni-Cr-B-Si сплавов / Ю. С. Борисов [и др.] // Порошковая металлургия. — 1988. — № 6. — С. 61—65.
52. Газотермическое напыление композиционных порошков / А. А. Кулик [и др.]. — Л. : Машиностроение, 1985. — 199 с.
53. Газотермические покрытия из порошковых материалов : справочник / Ю. С. Борисов [и др.]. — Киев : Наук. думка, 1987. — 544 с.
54. Звягов, Д. Н. Моделирование и исследование влияния режимов плазменного напыления на остаточные напряжения в системе «покрытие — основа» / Д. Н. Звягов, С. П. Кундас // Изв. Белорус. инж. акад., 1997. — № 1(3)/3. — С. 119—124.
55. Барвинок, В. А. Управление напряжённым состоянием и свойствами плазменных покрытий / В. А. Барвинок. — М. : Машиностроение, 1990. — 384 с.
56. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. — М. : Металлургия, 1977. — 647 с.
57. Иващенко, С. А. Деформация плоских деталей при нанесении покрытий из самофлюсующихся сплавов / С. А. Иващенко // Машиностроение : сб. науч. тр. ; под ред. И. П. Филонова. — Минск : Выш. шк., 1984. — Вып. 9. — С. 42—44.
58. Иващенко, С. А. Технологические способы снижения коробления деталей с покрытием / С. А. Иващенко // Машиностроение : сб. науч. тр. ; под ред. И. П. Филонова. — Минск : Технопринт, 2001. — С. 166—170.
59. Азизов, Р. О. Разработка износостойких газопламенных покрытий с повышенной прочностью сцепления : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.06 / Р. О. Азизов. — Минск : НИКТИ ПМ с ОП БРНПО ПМ, 1986. — 18 с.

60. *Куприянов, И. Л.* Износостойкость двухслойных покрытий при трении со смазочным материалом : [в ? т.] / И. Л. Куприянов, Е. П. Генин, Р. О. Азизов // Трение и износ. — 1987. — Т. 8. — № 2. — С. 354—357.

61. *Куприянов, И. Л.* Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления / И. Л. Куприянов, М. А. Геллер. — Минск : Наука і тэхніка, 1990. — 176 с.

62. *Вахабов, Б. Х.* Разработка процессов нанесения плазменных композиционных покрытий на основе железа и его сплавов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.06 / Б. Х. Вахабов. — Минск : БРПО ПМ, 1989. — 21 с.

63. *Вахабов, Б. Х.* Разработка получения газотермических покрытий на железной основе с повышенными эксплуатационными свойствами / Б. Х. Вахабов // Проблемы обработки поверхностей деталей машин концентрированными потоками энергии : тез. докл. конф. — Минск ; БелНИИТИ, 1988. — 121 с.

64. *Кот, В. А.* Газотермические износостойкие и коррозионностойкие покрытия системы «металл—стекло» и «металл—медь» / В. А. Кот, Б. Х. Вахабов // Коррозия и защита материалов : тез. докл. науч.-техн. конф. — Могилёв : [б. и.] ; Минск : БелНИИТИ, 1988. — 43 с.

65. *Фирас, К.* Технологическое обеспечение ресурса деталей машин, работающих в условиях ограниченной смазки, нанесением композиционных газопламенных покрытий : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / К. Фирас. — Минск : [б. и.], 1994. — 174 с.

66. *Гинберг, А. М.* Износостойкие и антифрикционные покрытия / А. М. Гинберг, А. Ф. Иванов. — М. : Машиностроение, 1982. — 43 с.

67. Сравнительная износостойкость твёрдых самофлюсующихся сплавов в различных средах / Н. В. Спиридонов [и др.] // Машиностроение и приборостроение. — Минск : Выш. шк., 1975. — Вып. 7. — С. 53—55.

68. Порошковая металлургия : материалы, технология, свойства, области применения : справ. / И. М. Федорченко [и др.]. — Киев : Наук. думка, 1985. — 624 с.

69. Порошковая металлургия и напылённые покрытия / В. А. Анциферов [и др.]. — М. : Металлургия, 1987. — 792 с.

70. Высокопрочные аморфные сплавы с карбидным упрочнением / А. М. Глезер [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1992. — № 9. — С. 3—6.

71. *Роман, О. В.* Справочник по порошковой металлургии : порошки, материалы, процессы / О. В. Роман, И. П. Габриелов. — Минск : Беларусь, 1988. — 175 с.

72. *Батищев, А. Н.* Обоснование рационального способа восстановления деталей / А. Н. Батищев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. — 1992. — № 9. — С. 30-31.

73. *Константинов, В. М.* Системный подход к проектированию и получению защитных покрытий из диффузионно-легированных сплавов / В. М. Константинов // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения : сб. науч. тр. ; под ред. С. А. Астапчика, П. А. Витязя. — Минск : Технопринт ; Новополоцк : ПГУ, 2001. — С. 6—71.

74. *Родионов, В. В.* Порошки металлические для газотермического напыления и наплавки покрытий. Каталог / В. В. Родионов, Л. И. Корнеев, И. С. Гельтман. — Тула : Тулачермет, 1989. — 17 с.

75. *Волосенков, В. Е.* Порошки для газотермических покрытий : Состав. Свойства. Применение / В. Е. Волосенков, И. Л. Куприянов. — Минск : Выш. шк., 1987. — 27 с.

76. *Этик, А. П.* Новые порошковые и композиционные материалы / А. П. Этик, К. К. Палеха ; под ред. В. Я. Шлюко. — Киев : УМК ВО, 1989. — 116 с.

77. *Кудинов, В. В.* Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров. — М. : Металлургия, 1992. — 432 с.

78. *Пантелеенко, Ф. И.* Самофлюсующиеся порошки и износостойкие покрытия из них / Ф. И. Пантелеенко, С. Н. Любецкий // Металлические покрытия. Обзорная инф. — Минск : БелНИИТИ, 1991 — 57 с.

79. *Константинов, В. М.* Разработка самофлюсующихся наплавочных материалов на железной основе и защитных покрытий из них специализированного назначения с использованием металлоотходов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / В. М. Константинов. — Минск : БГПА 1992. — 19 с.

80. *Ворошнин, Л. Г.* Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л. Г. Ворошнин, Ф. И. Пантелеенко, В. М. Константинов. — Минск : ФТИ ; Новополоцк : ПГУ, 1999. — 133 с.

81. *Кулик, О. П.* Современное состояние порошковой металлургии на американском континенте и в европейских странах / О. П. Кулик // Порошковая металлургия. — 1997. — № 5/6. — С. 105—116.

82. *Кулик, О. П.* Современное состояние порошковой металлургии на американском континенте и в европейских странах / О. П. Кулик // Порошковая металлургия. — 1997. — № 7/8. — С. 114—121.

83. *Дорожкин, Н. Н.* Упрочнение и восстановление деталей машин металлическими порошками / Н. Н. Дорожкин. — Минск : Наука и техника, 1975. — 152 с.

84. *Хасуи, А.* Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. — М. : Машиностроение, 1985. — 240 с.

85. *Кардаполова, М. А.* Улучшение качества газотермических покрытий дополнительным легированием и лазерной обработкой : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.07 / М. А. Кардаполова. — Минск : [б. и.], 1988. — 263 с.

86. *Гладкий, П. В.* Наплавочные сплавы на основе никеля и кобальта / П. В. Гладкий // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавочный металл : сб. науч. тр. ; под ред. И. И. Фрумина. — Киев : Наук. думка, 1977. — С. 119—130.

87. *Демидов, В. Г.* Свойства и структура покрытий из порошков типа ПГ-СР, полученных плазменным методом / В. Г. Демидов // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1997. — № 8. — С. 26—29.

88. *Шевченко, О. И.* Распределение химических элементов в структурных составляющих покрытия при наплавке никелевого самофлюсующегося сплава / О. И. Шевченко, Р. Е. Трекин, В. М. Фарбер // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1997. — № 6. — С. 5—7.

89. Получение порошковых изделий и покрытий из материалов на железной основе / Н. Н. Дорожкин [и др.]. — Минск : БелНИИНТИ, 1990. — 68 с.

90. *Жорняк, А. Ф.* Металлические порошки / А. Ф. Жорняк. — М. : Металлургия, 1981. — 86 с.

91. Наплавочные материалы стран — членов СЭВ. Каталог ; под ред. И. И. Фрумина, В. Б. Еремеева. — Киев — Москва : [б. и.], 1979. — 620 с.

92. Основные виды продукции Торезского завода наплавочных твердых сплавов. Каталог. — Донецк : Облполиграфиздат, 1987. — 31 с.

93. *Сидоров, А. И.* Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А. И. Сидоров. — М. : Машиностроение, 1987. — 192 с.

94. *Ощепков, Ю. П.* Методы регулирования структурной наследственности при формировании покрытий из расплывленных самофлюсующихся сплавов / Ю. П. Ощепков, Н. В. Ощепков // Исследование и разработка теоретических проблем в области порошковой металлургии и защитных покрытий : сб. науч. тр. / Ю. П. Ощепков, Н. В. Ощепкова. — Минск : БелНИИНТИ, 1984. — С. 180—184.

95. Железные порошки / В. В. Акименко [и др.]. — М. : Наука, 1982. — С. 64.

96. *Василенко, А. Г.* Создание износостойких газотермических покрытий из бористых эвтектических сплавов : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.07 / А. Г. Василенко. — Минск : [б. и.], 1990. — 198 с.

97. Композиционные покрытия на основе чугунных порошков / Ю. А. Харламов [и др.] // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения : сб. науч. тр. ; под ред. С. А. Астапчика, П. А. Витязя. — Минск : Технопринт ; Новополоцк : ПГУ, 2001. — С. 72—76.

98. *Василенко, А. Г.* О некоторых свойствах самофлюсующихся покрытий на железной основе, оплавленных лазерным излучением / А. Г. Василенко, Н. В. Спиридонов // Технологические процессы и оборудование для упрочнения деталей машин, инструмента и технологической оснастки : тез. докл. конф. — Минск : [б. и.], 1985. — С. 73—75.

99. Металловедение и термическая обработка стали : справочник : в 3 т. / под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Металлургия. — 1983. — Т. 2. — 367 с.

100. Структура и свойства боросодержащих порошковых покрытий / М. Д. Егоров [и др.] // Оптимизация структуры и свойств сталей и сплавов в свете реализации программы «Интенсификация-90» : тез. докл. конф. — Л. : [б. и.], 1987. — С. 66—69.

101. Формирование газотермических покрытий системы «металл—стекло». I. Структурно-фазовое состояние металлостеклянных покрытий / О. В. Роман [и др.] // Порошковая металлургия. — 1989. — № 10. — С. 30—37.

102. *Рагунович, С. П.* Задачи ремонтного производства, роль сварки и родственных технологий в их реализации / С. П. Рагунович, В. К. Шелег // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения : сб. науч. тр. ; под ред. С. А. Астапчика, П. А. Витязя. — Минск : Технопринт ; Новополоцк : ПГУ, 2001. — С. 13—16.

103. *Ильюшенко, А. Ф.* Ресурсосберегающие технологии упрочнения и восстановления конструкционных деталей с использованием газотермических

методов нанесения покрытий / А. Ф. Ильюшенко // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения : сб. науч. тр. ; под ред. С. А. Астапчика, П. А. Витязя. — Минск : Технопринт ; Новополоцк : ПГУ, 2001. — С. 17—22.

104. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П. А. Витязь [и др.]. — Минск : Беларус. навука, 1998. — 583 с.

105. *Ивашко, В. С.* Электротермическая технология нанесения защитных покрытий / В. С. Ивашко, И. Л. Куприянов, А. И. Шевцов. — Минск : Навука і тэхніка, 1996. — 375 с.

106. Современное состояние и основные тенденции развития плазменных методов нанесения защитных покрытий / И. Л. Куприянов [и др.]. — Минск : БелНИИТИ, 1986. — 40 с.

107. *Тер-Даниэлян, Б. И.* Электродуговая металлизация коленчатых валов / Б. И. Тер-Даниэлян, Л. В. Красниченко // Техника в сельском хозяйстве. — 1983. — № 4. — С. 58-59.

108. Сталь-молибденовые газотермические покрытия для поршневых колец форсированных дизелей / Г. А. Протасов [и др.] // Сварочное производство. — 1977. — № 1. — С. 17—22.

109. Теория и практика газопламенного напыления / П. А. Витязь [и др.]. — Минск : Навука і тэхніка, 1993. — 295 с.

110. Процессы плазменного нанесения покрытий: теория и практика / А. Ф. Ильюшенко [и др.] : под общ. ред. акад. НАН Беларуси А. П. Достанко, П. А. Витязя. — Минск : Науч. центр исслед. политики и бизнеса «Армита-Маркетинг, Менеджмент», 1999. — 544 с.

111. *Ивашко, В. С.* Технологические возможности плазменного напыления теплозащитных покрытий / В. С. Ивашко, А. А. Верстак, А. Ф. Ильюшенко // Газотермические и вакуумные покрытия в энергетике и двигателестроении : сб. науч. тр. / АН УССР, Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. — Киев : ИЭС им. Е. О. Патона, 1989. — С. 33—42.

112. Обработка материалов с использованием высококонцентрированных источников энергии / Б. А. Артамонов [и др.] // Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов : в 2 т. / под ред. В. П. Соломенцева. — М. : Высш. шк., 1983. — Т. 2. — 208 с.

113. *Молодык, Н. В.* Восстановление деталей машин : справочник / Н. В. Молодык, А. С. Зенкин. — М. : Машиностроение, 1989. — 480 с.

114. *Bick, H.* Advanced high velocity thermal spraying of metallic and ceramic powders / H. Bick, W. Jurgens // DUS—BER. — 1983. — Vol. 80. — P. 42—45.

115. *Parker, D. W.* HVOF. Moves into the industrial mainstream / D. W. Parker, G. L. Runter // Advanced Materials & Processes. — 1994. — № 7. — P. 31—35.

116. *Семёнов, А. П.* Детонационные покрытия и их применение / А. П. Семёнов, Ю. П. Федько, А. И. Григоров. — М. : НИИмаш, 1977. — 65 с.

117. *Бартенев, С. С.* Детонационные покрытия в машиностроении / С. С. Бартенев, Ю. П. Федько, А. И. Григоров. — Л. : Машиностроение, 1982. — 215 с.

118. *Костиков, В. И.* Плазменные покрытия / В. И. Костиков, Ю. А. Шестерин. — М. : Metallurgy, 1978. — 160 с.
119. *Линник, В. И.* Современная техника газотермического напыления покрытий / В. И. Линник, П. Ю. Пекшев. — М. : Машиностроение, 1985. — 116 с.
120. Нанесение покрытий плазмой / В. В. Кудинов [и др.]. — М. : Наука, 1990. — 406 с.
121. *Кудинов, В. В.* Плазменные покрытия / В. В. Кудинов. — М. : Наука, 1977. — 184 с.
122. Плазменная металлизация в вакууме / А. П. Достанко [и др.]. — Минск : Наука и техника, 1983. — 279 с.
123. The LPPS Coatings Structure and Oxygen Content influence on the Durability of High Temperature and Thermal Barrier Coatings / O. V. Roman [et al.] // Proceedings: 2-nd Plasma-Technik-Symposium. — Wohlen (Switzerland) : [s. n.], 1991. — P. 121—129.
124. Исследование плазменных покрытий из порошков W, Mo, Ta, Ti, нанесённых в динамическом вакууме / И. Л. Куприянов [и др.] // Высокоэнергетические процессы получения композиционных и порошковых изделий, материалов и покрытий. — Минск : Выш. шк., 1989. — С. 60—64.
125. Новые аспекты подводного плазменного напыления покрытий / А. А. Верстак [и др.] // Защитные покрытия при изготовлении деталей машин и их ремонте : тез. докл. науч. конф. — Минск : [б. и.], 1992. — 11 с.
126. Современные композиционные материалы / под ред. П. Браутмана, Р. Крока. — М. : Мир, 1970. — 672 с.
127. *Дорожкин, Н. Н.* Упрочнение и восстановление деталей машин металлическими порошками / Н. Н. Дорожкин. — Минск : Наука и техника, 1975. — 152 с.
128. *Рыжов, Э. В.* Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Э. В. Рыжов, С. А. Клименко, О. Г. Гуцаленко. — Киев : Наук. думка, 1994. — 180 с.
129. *Кардаполова, М. А.* Влияние режимов лазерной обработки на микроструктуру самофлюсующихся сплавов / М. А. Кардаполова, Н. В. Спиридонов, О. Н. Статкевич // Машиностроение : сб. науч. тр. ; под ред. И. П. Филонова. — Минск : Выш. шк., 1984. — Вып. 10. — С. 120—123.
130. *Ильющенко, А. Ф.* Улучшение свойств газотермических покрытий применением термической обработки / А. Ф. Ильющенко, В. А. Оковитый, С. Б. Соболевский // Технологические процессы и оборудование для упрочнения деталей машин, инструмента и технологической оснастки : тез. докл. конф. — Минск : [б. и.], 1985. — С. 8—10.
131. *Сомов, А. И.* Эвтектические композиции / А. И. Сомов, М. А. Тихоновский. — М. : Metallurgy, 1975. — 304 с.
132. *Таран, О. Н.* Структура эвтектических сплавов / О. Н. Таран, В. И. Мазур. — М. : Metallurgy, 1978. — 196 с.
133. Способ упрочнения поверхностей деталей машин / Н. В. Спиридонов [и др.] // Заявка № а 20041124 от 02. 12. 2004 ; опубл. : Официальный бюл. № 3. — Минск : МЦИС, 2006. — 19 с.

134. Способ упрочнения поверхностей деталей машин : пат. 9936 Респ. Беларусь МПК (2006) С 23С 4/18 С1 / Н. В. Спиридонов [и др.] ; заявитель Белорус. нац. технич. ун-т. — № а 0000011 ; заявл. 04. 01. 00 ; опубл. 30. 06. 04 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. — 2006. — № 3. — 19 с.

135. *Вахабов, Б. Х.* Разработка процессов нанесения плазменных композиционных покрытий на основе железа и его сплавов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.06 / Б. Х. Вахабов. — Минск : БРНПО ПМ. — 1989. — 21 с.

136. *Вахабов, Б. Х.* Разработка получения газотермических покрытий на железной основе с повышенными эксплуатационными свойствами / Б. Х. Вахабов // Проблемы обработки поверхностей деталей машин концентрированными потоками энергии : тез. докл. конф. — Минск : Бел НИИНТИ, 1988. — 121 с.

137. Формирование газотермических покрытий системы металл-стекло. I. Структурно-фазовое состояние металлостеклянных покрытий / О. В. Романов [и др.] // Порошковая металлургия. — 1989. — № 10. — С. 30—37.

138. Порошки для газотермического напыления и наплавки. Типы : ГОСТ 28377-89. — Введ. 01. 01. 91. — Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1991.

139. *Спиридонов, Н. В.* Лабораторные работы по дисциплине «Основы повышения эксплуатационных свойств поверхностей» для студентов специальности 1-36 01 04 Оборудование и технология высокоэффективных процессов обработки материалов : в 2 ч. / Н. В. Спиридонов, С. Э. Крайко, А. С. Володько. — Минск : БНТУ, 2003. — Ч. 1. — 90 с.

140. Лабораторный практикум по курсу «Основы научных исследований в технологии машиностроения» / И. Л. Баршай [и др.]. — Минск : БГПА, 1996. — 116 с.

141. *Спиридонов, Н. В.* Установка торцового трения для испытания материалов / Н. В. Спиридонов, В. С. Ивашко, В. А. Протасевич // Машиностроение. — Минск : Выш. шк., 1979. — Вып. 3. — С. 25—28.

142. *Зыков, Р.* Планирование эксперимента [Электронный ресурс] / Р. Зыков. — Уссурийск : [б. и.], 2001. — Режим доступа: [http://kpris.ru/content/statistica/modules/stexdes.html# general](http://kpris.ru/content/statistica/modules/stexdes.html#general). — Дата доступа: 19.03.2005. — Загл. с экрана.

143. *Адлер, Ю. П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. — М. : Металлургия, 1976. — 279 с.

144. *Монтгомери, Д. К.* Планирование эксперимента и анализ данных : пер. с англ. / Д. К. Монтгомери. — Л. : Судостроение, 1980. — 384 с.

145. *Степанов, Н. М.* Статистическая обработка результатов испытаний / Н. М. Степанов. — М. : Машиностроение, 1972. — 215 с.

146. *Голубец, В. М.* Метод расчёта долговечности опор скольжения турбобура ЗТСШ1-195ТЛ / В. М. Голубец, М. В. Чернец // Физико-химическая механика материалов, 1992. — № 2. — С. 95—98.

147. *Когаев, В. П.* Прочность и износостойкость деталей машин : учеб. пособие для машиностроит. специальностей вузов / В. П. Когаев, Ю. Н. Дроздов. — М. : Высш. шк., 1991. — 319 с.

148. *Спиридонов, Н. В.* Исследование триботехнических характеристик композиционных газотермических покрытий на основе железа / Н. В. Спиридонов, И. О. Соколов // Современные методы проектирования машин : в 7 т. — Минск : [б. и.], 2004. — Вып. 2. : Качество изделий машиностроения. Проектирование материалов и конструкций. — Т. 2. — С. 73—77.

149. Оптимизация процесса плазменного напыления механических смесей / Н. В. Спиридонов [и др.] // Соединение и резка материалов, покрытия : матер. Междунар. науч.-техн. конф. — Минск : [б. и.], 2006. — С. 86—89.

150. Исследование износостойких характеристик композиционных газотермических покрытий на основе железа / Н. В. Спиридонов [и др.] // Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса сельскохозяйственной техники : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. 6—8 апр. 2004 г. : в 3 ч. / редкол. Н. И. Шилов [и др.]. — Минск : БГАТУ, 2006. — Ч. 3. — С. 147—154.

151. *Коробейников, В. В.* Исследование износостойкости оплавленных и неоплавленных газотермических покрытий из композиций на основе самофлюсующихся материалов / В. В. Коробейников, И. О. Соколов, А. С. Володько // Машиностроение : Респ. межведомств. сб. науч. тр. : под ред. Б. М. Хрусталёва. — Минск : [б. и.], 2007. — Вып. 23. — С. 95—100.

152. Исследование и разработка износостойких композиционных материалов для упрочнения крупногабаритных высоконагруженных валов бумагоделательных машин / Н. В. Спиридонов [и др.] // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин : сб. науч. тр. VI Междунар. науч.-техн. конф., 24—26 апр. 2007 г. : в 3 т. — Новополоцк : [б. и.], 2007. — Т. 1. — С. 70—73.

153. *Спиридонов, Н. В.* Повышение прочности газотермических покрытий активацией контактной зоны / Н. В. Спиридонов, И. О. Соколов // Вестн. ПГУ. Сер. В. Прикладн. науки. — 2008. — № 2. — С. 107—112.

154. *Когаев, В. П.* Прочность и износостойкость деталей машин : учеб. пособие для машиностроит. специальностей вузов / В. П. Когаев, Ю. Н. Дроздов. — М. : Высш. шк., 1991. — 319 с.

155. *Ворошнин, Л. Г.* Борирование промышленных сталей и чугунов / Л. Г. Ворошнин. — Минск : Беларусь, 1981. — 134 с.

156. Сопrotивляемость резонансным колебаниям сталей титановых и алюминиевых сплавов лопаток компрессора / Г. С. Кривоногов [и др.] // Рассеяние энергии при колебаниях механических систем. — Киев : Наук. думка, 1970. — С. 394—422.

157. *Спиридонов, Н. В.* Исследование физико-механических свойств газотермических покрытий для восстановления шеек пресовых валов бумагоделательных машин / Н. В. Спиридонов, И. О. Соколов, А. С. Володько // Машиностроение : Респ. межведомств. сб. науч. тр. : в 2 т. / под ред. Б. М. Хрусталёва. — Минск : [б. и.], 2005. — Т. 2. — Вып. 21. — С. 129—134.

158. *Спиридонов, Н. В.* Исследование технологических параметров плазменного напыления подслоя из терморреагирующего материала NiAl / Н. В. Спиридонов, И. О. Соколов, Л. И. Пилецкая // Сб. тр. XV Междунар.

науч.-техн. конф., Севастополь, 15—20 сент. 2008 г. : в 4 т. — Донецк : ДонНТУ, 2008. — Т. 3. — С. 170—175.

159. *Спиридонов, Н. В.* Исследование физико-механических и триботехнических свойств антифрикционных газотермических покрытий на основе бронз и баббитов / Н. В. Спиридонов, И. О. Соколов, Л. И. Пилецкая // Машиностроение : Респ. межведомств. сб. науч. тр. : в 2 т. ; под ред. И. П. Филонова. — Минск : Технопринт, 2004. — Т. 1. — Вып. 20. — С. 147—152.

160. *Кузнецов, В. Д.* Физика твёрдого тела / В. Д. Кузнецов. — Томск : Полиграфист, 1947. — 544 с.

161. *Рыжов, Э. В.* О прочности сцепления покрытия, наносимого напылением, со стальной основой / Э. В. Рыжов, А. Ф. Чистопьян, В. С. Харченко // Вестн. машиностроения, 1973. — № 12. — С. 32—35.

162. Исследование тангенциальной прочности адгезионных связей покрытий / Э. В. Рыжов [и др.] // Стандартизация и унификация средств и методов испытания на трение и износостойкость : в 3 т. : тез докл. на Всесоюз. науч.-техн. конф. — М. : [б. и.], 1975. — Т. 3. — С. 67—69.

163. *Uhlig, H. H.* Mechanism of fretting corrosion / H. H. Uhlig. — J. Appl. Mech. — 1954. — Vol. 21. — P. 401—407.

164. *Иванова, В. С.* Усталость и хрупкость металлических материалов / В. С. Иванова. — М. : Наука, 1968. — 452 с.

165. *Спиридонов, Н. В.* Исследование износостойкости газотермических покрытий для восстановления прессовых валов бумагоделательных машин / Н. В. Спиридонов, И. О. Соколов, А. С. Володько // Машиностроение : Респ. межведомств. сб. научн. тр. : в 2 т. / под ред. Б. М. Хрусталёва. — Минск : [б. и.], 2005. — Т. 2. — Вып. 21. — С. 134—139.

166. *Титченер, Э. Л.* Скрытая энергия при наклёпе : в 4 т. // Успехи физики металлов : сб. / Э. Л. Титченер, М. Б. Бевер. — М. : Металлургиздат, 1961. — Т. 4. — С. 34—39.

167. *Хаазе, Р.* Термодинамика необратимых процессов / Р. Хаазе. — М. : [б. и.], 1967. — 544 с.

168. *Сверлин, Р. А.* Термодинамика твёрдого состояния / Р. А. Сверлин. — М. : Металлургиздат, 1963. — 520 с.

169. *Александров, В. М.* Плоская контактная задача при наличии износа для упругого слоя большой толщины / В. М. Александров, Л. А. Галин, Н. П. Пириев // Изв. АН СССР. — 1978. — № 4. — С. 58—66.

170. *Александров, В. М.* Плоские контактные задачи теории упругости для неклассических областей при наличии износа / В. М. Александров, Е. В. Коваленко // Прикладная механика и техническая физика. — 1980. — № 3. — С. 163—172.

171. *Александров, В. М.* К вопросу об изнашивании сопряжения «вал—втулка» : [в ? т.] / В. М. Александров, Е. В. Коваленко // Трение и износ. — 1982. — Т. 3. — № 6. — С. 1016—1025.

172. *Блюмен, А. В.* Расчётная оценка интенсивности изнашивания и ресурса сопряжения «вал—втулка» с обратной парой трения / А. В. Блюмен, Г. М. Харач, Д. Г. Эфрос // Вестн. машиностроит. — 1976. — № 2. — С. 29—32.

173. *Коровчинский, М. В.* Контактное взаимодействие трущихся тел и расчёт сил трения и износа / М. В. Коровчинский. — М. : [б. и.], 1971. — С. 130—140.

174. *Андрейкив, А. Е.* К теории износа материалов при сухом трении / А. Е. Андрейкив, В. В. Панасюк, М. В. Чернец : [в ? т.] // Физико-химическая механика материалов. — 1981. — Т. 17. — № 2. — С. 51—57.

175. К оценке износа подвижных сопряжений гидроцилиндра выносных опор автокранов и подбор оптимальных сочетаний материалов их пар трения / А. В. Андрейкив [и др.]. — Львов : Деп. в ВИНТИ, 1982. — № 48—81. — 882 с.

176. *Голубец, В. М.* О расчёте долговечности диффузионных покрытий при абразивном изнашивании : [в ? т.] / В. М. Голубец, М. В. Чернец // Физико-химическая механика материалов. — 1983. — Т. 19. — № 6. — С. 110-111.

177. *Чернец, М. В.* К вопросу об исследовании кинетики изнашивания материалов при некоторых видах трения скольжения : [в ? т.] / М. В. Чернец // Трение и износ. — 1987. — Т. 8. — № 4. — С. 662—670.

178. Методические указания к практическим работам по курсу «Технологические методы повышения качества поверхности в машиностроении» для студентов специальности «Технология машиностроения» / Л. И. Баршай [и др.]. — Минск : [б. и.], 1989. — 50 с.

179. *Гаджиев, Г. Х.* Оптимальное проектирование контактной пары «оставной цилиндр—плунжер» / Г. Х. Гаджиев // Трение и износ. — 2004. — № 5. — 466 с.

180. Дипломное проектирование по технологии машиностроения / В. В. Бабук [и др.]. — Минск : Выш. шк., 1979. — 279 с.

181. *Горбацевич, Ф. М.* Курсовое проектирование по технологии машиностроения / Ф. М. Горбацевич. — Минск : Выш. шк., 1983. — 343 с.

182. *Спиридонов, Н. В.* Влияние лазерной обработки на структурно-фазовый состав напылённых Ni-Cr-B-Si-покрытий / Н. В. Спиридонов, И. О. Соколов, А. В. Кулина // Вестн. БНТУ. — 2007. — № 3. — С. 22—25.

183. *Соколов, И. О.* Исследование влияния дистанции напыления на прочность сцепления газотермических покрытия при восстановлении опорных поверхностей прессовых валов / И. О. Соколов, Н. А. Гришан // Материалы науч. конф. учащихся, студентов и аспирантов, посвященной 85-летию БНТУ ; Минск : [б. и.], 15—17 нояб. 2005 г. / редкол. : С. М. Силюк [и др.]. — Минск : [б. и.], 2005. — С. 157—161.

Научное издание

**Сокоров Игорь Олегович,
Спиридонов Николай Васильевич,
Нерода Михаил Владимирович**

**ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ
ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ
ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМ
НАПЫЛЕНИЕМ**

Монография

Ведущий редактор *Е. Г. Хохол*
Технический редактор *Н. В. Иванова*
Корректор *С. А. Березнюк*
Компьютерная вёрстка *В. В. Кукреш*

Подписано в печать 19.11.2012.
Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л. 10,93. Уч-изд. л. 8,28.
Заказ 155. Тираж 110 экз.

ЛИ 02330/0552803 от 09.02.2010

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Барановичский государственный университет»,
225404, г. Барановичи, ул. Войкова, 21.

Инженерный

факультет

БарГУ

Специальности:

- ✓ Технология машиностроения;
- ✓ Технологическое оборудование машиностроительного производства;
- ✓ Информационные системы и технологии;
- ✓ Автоматизация технологических процессов и производств;
- ✓ Техническое обеспечение процессов сельскохозяйственного производства;
- ✓ Экономика и организация производства (машиностроение);
- ✓ Агроинженер;
- ✓ Зооинженер.

Ведущие промышленные предприятия г. Барановичи являются базовыми: станкостроительный завод «Атлант», завод автоматических линий, автоагрегатный завод, завод торгового машиностроения, завод станкопринадлежностей и др. На них студенты проходят производственные и преддипломные практики. Лаборатории, конструкторские бюро и производственные участки предприятий, оснащенные современными техническими средствами, используются для проведения лабораторных работ и научных исследований.

Выпускники распределяются на предприятия республики с учетом уровня теоретической и практической подготовленности.

Факультет педагогики и психологии

Специальности:

- ✓ Дошкольное образование. Практическая психология;
- ✓ Дошкольное образование. Иностранный язык (английский);
- ✓ Начальное образование. Белорусский язык и литература;
- ✓ Начальное образование. Физическая культура;
- ✓ Белорусский язык и литература. Русский язык и литература;
- ✓ Технология (обслуживающий труд). Социальная педагогика;
- ✓ Практическая психология. Технология (обслуживающий труд).

На факультете созданы необходимые условия для обучения, отдыха, занятий спортом и художественной самодеятельностью, участия в конкурсах профессионального мастерства.

Действуют танцевальный кружок, ансамбль народного пения, кружки «Психея», «Психология и здоровье», моделирования одежды и театр моды, студии изобразительного искусства и декоративно-прикладного творчества. «Літаратурна-музычная гасцеўня» и вечера юмора «Беларусы жартуюць» регулярно собирают поклонников сценического творчества. Хорошей традицией стало проведение Недели кафедр факультета.

ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ КУРСЫ

Целенаправленная подготовка к централизованному тестированию по следующим предметам: *русский, белорусский, английский и немецкий языки, математика, физика, биология, История Беларуси, обществоведение..*

Вечерние подготовительные курсы

Предпочтительны для учащихся выпускных классов школ, гимназий, лицеев и средних специальных учебных заведений г. Барановичи.

Срок обучения – 7,5 месяцев (3 часа в неделю по каждому предмету в вечернее время).

Подготовительные курсы выходного дня

Предпочтительны для иногородних и проживающих в сельской местности.

Срок обучения – 6,5 месяцев (5 часов по выходным дням один раз в месяц по каждому из выбранных предметов в дневное время).

Ускоренные вечерние подготовительные курсы

Предпочтительны для учащихся выпускных классов школ, гимназий, лицеев и средних специальных учебных заведений г. Барановичи.

Срок обучения – 3,5 месяцев (3 часа в неделю по каждому предмету в вечернее время).

Двухнедельные подготовительные курсы

Интенсивная подготовка по одному предмету централизованного тестирования.

Срок обучения – 2 недели (4 часа в день по каждому предмету в вечернее время).

Наш адрес: г. Барановичи, ул. Войкова, 21,

уч. корпус 2, каб. 12.

Тел./факс (0163) 45-87-99.