

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

На правах рукописи



Трифонов Григорий Игоревич

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ШНЕКА
ТРАНСПОРТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ПЛАЗМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ
ИЗНОСОСТОЙКОГО КОМПОЗИТНОГО ПОКРЫТИЯ**

Специальность 05.20.03 – Технологии и средства технического
обслуживания в сельском хозяйстве

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Жачкин С.Ю.

Воронеж – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Обзор исследований и разработок по восстановлению изношенных деталей машин агропромышленного комплекса.....	13
1.1 Особенности условий работы шнеков и факторы, определяющие их износостойкость	16
1.1.1 Особенности условий работы и виды износа рабочих поверхностей шнеков	20
1.1.2 Абразивный износ и факторы, определяющие износостойкость рабочих поверхностей шнеков	22
1.2 Существующие методы повышения срока службы рабочих поверхностей шнеков.....	25
1.2.1 Конструктивные и эксплуатационные способы повышения срока службы рабочих поверхностей шнеков	25
1.2.2 Технологические способы повышения срока службы рабочих поверхностей шнеков	26
1.3 Восстановление рабочих поверхностей плазменным напылением.....	31
1.3.1 Факторы, определяющие прочностные свойства износостойких покрытий.....	35
1.3.2 Анализ методов повышения качества износостойких покрытий.....	38
1.3.3 Анализ методов упрочняющей обработки износостойких покрытий.....	41
1.3.4 Анализ методов регулирования остаточных напряжений в износостойких покрытиях.....	43
1.4 Подбор композитного материала для плазменного напыления износостойкого покрытия	46
1.4.1 Анализ матрицы композитных материалов, применяемых при плазменном напылении износостойких покрытий.....	46
1.4.2 Анализ наполнителей композитного материала.....	48

1.5 Выводы по первой главе. Постановка целей и задач	54
2 Теоретические исследования процесса плазменного напыления композитного материала на рабочие поверхности шнека	55
2.1 Теоретическое исследование кинематических режимов при плазменном напылении	55
2.2 Теоретическое исследование процесса формирования равнотолщинного покрытия при плазменном напылении	61
2.3 Теоретическое исследование теплофизических особенностей процесса плазменного напыления композитного материала.....	64
2.4 Оценка контактной температуры при соединении композитного материала покрытия с рабочими поверхностями шнека	71
2.5 Выводы по второй главе.....	75
3 Методика экспериментальных исследований.....	76
3.1 Экспериментальное оборудование и методика проведения опытов ...	76
3.2 Обоснование выбора рабочих материалов	80
3.3 Методика проведения исследований физико-механических свойств композитного покрытия	82
3.3.1 Определение прочности сцепления композитного покрытия с основой.....	82
3.3.2 Определение твердости и микротвердости композитного покрытия	84
3.3.3 Методика металлографического и рентгеноструктурного анализа композитного покрытия	86
3.3.4 Определение износостойкости композитного покрытия	87
3.4 Методика эксплуатационных испытаний восстановленных поверхностей шнека.....	89
3.5 Выводы по третьей главе	90
4 Экспериментальное исследование процесса нанесения композитных покрытий плазменным напылением.....	91

4.1	Определение состава композитного материала для нанесения покрытий плазменным напылением	91
4.2	Определение рациональных технологических режимов нанесения покрытий плазменным напылением	95
4.3	Исследование прочности сцепления получаемых композитных покрытий с основой	106
4.4	Исследование твердости получаемых композитных покрытий.....	108
4.5	Исследование микротвердости покрытий	113
4.6	Исследование микроструктуры композитного покрытия.....	116
4.7	Исследование износостойкости композитных покрытий.....	118
4.8	Выводы по четвертой главе	121
5	Технология восстановления плазменным напылением износостойких композитных покрытий	123
5.1	Основные положения технологического процесса по восстановлению рабочих поверхностей шнеков	123
5.2	Оборудование для осуществления плазменного напыления композитных покрытий на рабочие поверхности шнека.....	123
5.3	Экономическое обоснование эффективности разработанной технологии	127
5.4	Выводы по пятой главе.....	131
	Заключение	132
	Список литературы	135
	Приложение А	156
	Приложение Б.....	160
	Приложение В.....	163
	Приложение Г	165

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день в агропромышленном комплексе (АПК) эффективное использование специального оборудования обеспечивается своевременным техническим обслуживанием и качественным выполнением ремонтных работ. При этом необходимо учесть, что стоимость запасных деталей составляет практически 70 % от общей стоимости проведения ремонта, а стоимость восстановленных деталей – 40...60 % от стоимости новых. Следовательно, задача восстановления с целью дальнейшего использования рабочих узлов и механизмов специального оборудования является актуальной.

Согласно национальному докладу о ходе и результатах реализации в 2020 году Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия, а также 502 заседанию Совета Федерации Федерального Собрания Российской Федерации 31 марта 2021 года, в настоящее время значительное внимание необходимо уделять вопросу проведения ремонтных и восстановительных работ сельскохозяйственной техники. В частности, рассмотреть такие пути решения, как модернизация существующих образцов техники, восстановление деталей, механизмов и узлов с упрочнением их рабочих поверхностей путем применения новых технологических процессов и материалов.

В сельском хозяйстве при транспортировке зерновых культур и других сыпучих материалов активно используются шнековые транспортирующие конвейеры, у которых наиболее ответственным агрегатом является шнек. Ресурс и работоспособность конвейера напрямую зависят от степени износа рабочих поверхностей транспортирующего шнека. При этом до 50 % всех проблем, связанных с износом деталей машин в секторе сельского хозяйства, приходится на абразивный износ.

Для восстановления и упрочнения рабочих поверхностей деталей машин и механизмов АПК активно применяют газотермические технологии по нанесению покрытий, в частности, плазменное напыление. Кроме того, одним из перспективных и экономически выгодных путей увеличения ресурса восстанавливаемых деталей является разработка функциональных композитных покрытий и их нанесение на рабочие поверхности деталей сельхозмашин.

Диссертация выполнена в соответствие с комплексной целевой программой ГБ № 2016.39. Научно-исследовательская работа «Теория и практика машиностроительного производства» кафедры «Автоматизированное оборудование машиностроительного производства» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет».

Степень разработанности темы. При разработке новых функциональных покрытий с высокой износостойкостью, как правило, за основу принимают высоколегированные сплавы на основе никеля или железа. Проблемам восстановления изношенных деталей машин с помощью технологий по нанесению функциональных покрытий посвящены фундаментальные работы таких авторов, как Черноиванов В.И., Завражнов А.И., Жачкин С.Ю., Ли Р.И., Астанин В.К., Кадырметов А.М., Шарифуллин С.Н., Пузряков А.Ф., Ильющенко А.Ф., Башкирцев В.И., Бобович Б.Б., Быков В.В., Голубев И.Г., Козырева Л.В., Краснощеков Н.В., Федоренко В.Ф., и др. Тем не менее на сегодняшний день научные исследования по напылению металломатричных композитов на стальные рабочие поверхности деталей, которые эксплуатируются в условиях абразивного изнашивания, недостаточно изучены.

Настоящая работа посвящена восстановлению рабочих поверхностей деталей транспортирующих устройств АПК, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания, плазменным напылением износостойких композитных покрытий.

Объектом исследования являются композитные покрытия на основе порошка ПР-НХ17СР4, нанесенные газотермическим способом плазменного

напыления на рабочие поверхности шнека транспортирующего конвейера.

Предмет исследования: физико-механические свойства дисперсно-наполненных композитных покрытий, полученных способом плазменного напыления.

Цель работы: повышение износостойкости и снижение себестоимости восстановления рабочих поверхностей шнека транспортирующего конвейера газотермическим способом плазменного напыления износостойкого композитного покрытия.

Задачи исследования:

1) получить аналитические зависимости кинематических режимов плазменного напыления от геометрических особенностей рабочих поверхностей шнека при формировании износостойкого композитного покрытия;

2) разработать новый состав дисперсно-наполненного композитного материала для плазменного напыления износостойких покрытий;

3) определить рациональные технологические режимы нанесения композитного материала плазменным напылением;

4) построить регрессионные модели зависимостей физико-механических свойств нанесенных покрытий на рабочие поверхности шнека от технологических параметров плазменного напыления;

5) разработать оборудование для плазменного напыления, позволяющее получать качественные композитные покрытия на винтовых и цилиндрических поверхностях шнека.

Научная новизна работы:

1) получены аналитические зависимости формообразования композитных покрытий на основе самофлюсующегося порошка ПР-НХ17СР4, отличительной особенностью которых является учет геометрических форм восстанавливаемой сложнопрофильной детали;

2) разработан состав дисперсно-наполненного композитного материала для плазменного напыления рабочих поверхностей шнека транспортирующего конвейера, отличительной особенностью которого является учет размеров

и концентрации наполнителя, позволяющего получать износостойкое композитное покрытие с повышенной прочностью сцепления с основой;

3) разработаны технологические режимы плазменного напыления дисперсно-наполненного композитного материала, отличающиеся корректировкой параметров в зависимости от дисперсности и концентрации наполнителя исходного порошка композитного покрытия;

4) получены регрессионные модели, связывающие параметры напыления с физико-механическими и эксплуатационными характеристиками сформированных композитных покрытий, отличительной особенностью которых является содержание предикторов как электрической, так и механической составляющей процесса получения композитного покрытия, так и предикторов концентрации и дисперсности наполнителя;

5) разработана установка для нанесения композитных материалов на поверхности деталей плазменным напылением, отличающаяся тем, что плазматрон выполнен с возможностью вращения в двух перпендикулярных проекциях двух координатных плоскостей по заданной программе, а также дополнительно введёнными элементами, обеспечивающими корректировку управляющей программы напыления в зависимости от геометрических особенностей детали и дефектов на её восстанавливаемой поверхности.

Теоретическая значимость работы заключается в получении и обосновании аналитических зависимостей, связывающих технологические режимы плазменного напыления с физико-механическими и эксплуатационными характеристиками сформированного композитного покрытия с целью обеспечения его качественно-точных параметров.

Практическую значимость работы. Разработан состав дисперсно-наполненного композитного материала, состоящего из непрерывной фазы – самофлюсующегося порошка ПР-НХ17СР4 и дисперсной фазы – карбида титана (TiC). Сформированное покрытие из разработанного композитного материала на рабочих поверхностях шнека обладает высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Разработаны технологические режимы плазменного напыления дисперсно-наполненного композитного материала, обеспечивающие высокую когезию и износостойкость покрытия, а также необходимую прочность его сцепления с основой.

Разработана установка для нанесения композитных материалов на поверхности деталей плазменным напылением, обеспечивающая высокую точность перемещения плазматрона относительно обрабатываемой поверхности детали, что напрямую оказывает положительное влияние на качество формируемого покрытия.

Методология и методы исследования. Исследования проводились с использованием методов системного анализа и теории электрофизического формообразования поверхностного слоя. Научная методика исследования заключается в комплексном рассмотрении взаимосвязи технологических режимов плазменного напыления, прочности сцепления покрытия с основой, твердости, микротвердости, износостойкости и микроструктуры сформированного покрытия. Экспериментальные исследования проведены с использованием современных стандартизированных методик на сертифицированном оборудовании и разработанной установке. Результаты исследований обрабатывались с использованием методов дисперсионного и регрессионного анализа.

Положения, выносимые на защиту:

1) аналитические зависимости формообразования композитных покрытий плазменным напылением, позволяющие учитывать геометрические формы восстанавливаемой сложнопрофильной детали;

2) состав дисперсно-наполненного композитного материала: порошок ПР-НХ17СР4 фракцией 40-64 мкм – 76,5 % и TiC фракцией 63-80 мкм – 23,5 % для нанесения покрытий плазменным напылением, обеспечивающий высокую прочность сцепления покрытия с основой и износостойкость;

3) технологические режимы плазменного напыления композитного покрытия 76,5 % ПР-НХ17СР4 + 23,5 % TiC при напряжении на дуге 260 В –

сила тока дуги плазмотрона 233...248 А, дистанция напыления 81...83 мм, массовый расход напыляемого материала 0,4...0,5 г/с, скорость вращения детали 35...37 мин⁻¹ (для цилиндрической поверхности), подача 4...6 мм/об (для цилиндрической поверхности), скорость перемещения плазмотрона 3...7 мм/мин (для винтовой поверхности), объемный расход плазмообразующего газа 0,8...1,8 л/с, позволяющие создавать требуемую микро- и макроструктуру нанесенного слоя в 2,52 раза превосходящую по износостойкости упрочняющий слой, выполненный легированным материалом из порошка ПР-НХ17СР4;

4) результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик износостойкого композитного покрытия, нанесенного газотермическим способом плазменного напыления;

5) установка для нанесения композитных материалов плазменным напылением, позволяющая наносить качественные функциональные покрытия за счет высокой точности перемещения плазмотрона относительно обрабатываемой поверхности детали.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных в диссертационной работе научных результатов обеспечивается обоснованным выбором допущений и ограничений, которые соответствуют конкретным условиям и эксплуатационным особенностям шнека транспортирующего конвейера, корректностью постановки решаемых задач, применением комплекса современных методов исследования, необходимым объемом экспериментальных данных, а также повторяемостью основных выявленных закономерностей.

Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на международной научно-практической конференции, посвященной 115 годовщине со дня рождения профессора Харитончика Ефима Мироновича «Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения» (2017 г., г. Воронеж); международной научно-практической конференции «Виртуальное моделирование,

прототипирование и промышленный дизайн» (2017 г., г. Тамбов); международной конференции «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений» (2018 г., г. Тамбов); всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции с элементами научной школы для молодых ученых «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий» (2018 г. и 2019 г., г. Казань); международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в машиностроении» (2019 г., г. Томск); международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК» (2019 г., г. Ставрополь); международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (2019 г. и 2021 г., г. Москва); международной конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (2019-2021 г.г., г. Севастополь); научном семинаре технологов-машиностроителей «Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий» (2021 г., г. Ростов-на-Дону).

Результаты диссертационных исследований внедрены в ООО «ИНОКС РЕМ» и ООО «Совтех», что подтверждено соответствующими актами (приложение А).

Личный вклад соискателя заключается в постановке задач исследования, выборе методов, разработке методики исследований, выполнении математических преобразований, получении и реализации на ЭВМ аналитических зависимостей, разработке программных продуктов по определению кинематических режимов напыления, выполненных лично автором; подготовке публикаций по теме диссертационной работы, проведении экспериментов, формулировке выводов, предложений и рекомендаций, выполненных при участии автора.

Публикация результатов исследования. Результаты проведенных исследований опубликованы в 39 научных статьях, в том числе шестнадцать статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях, в которых должны

быть опубликованы основные научные результаты диссертаций. По результатам диссертационной работы получено два патента Российской Федерации на изобретение и три свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 180 наименований и 4 приложений. Диссертация изложена на 166 страницах машинописного текста, включает 51 рисунок и 22 таблицы.

1 Обзор исследований и разработок по восстановлению изношенных деталей машин агропромышленного комплекса

Одним из эффективных направлений по обеспечению рационального и качественного использования техники и специального оборудования является своевременный ремонт, плановое техническое обслуживание, а также наличие запасных частей и восстановление изношенных деталей машин. Как показывает практика [112, 121, 171, 172], при проведении ремонтных работ, в частности при восстановлении изношенных поверхностей деталей машин, число технологических операций меньше чем при изготовлении новых деталей механизмов.

По статистическим данным около 20 % деталей в цехах сельскохозяйственного производства являются утильными, 25-40 % годными для дальнейшей эксплуатации, а остальные 40-55 % можно восстановить [112, 121, 171]. Экономические средства, выделяемые на производство новых деталей, достигают до 70 % от себестоимости ремонта. По данным предприятий и цехов по ремонту оборудования и транспортных устройств затраты на материал на производство новых деталей машин достигает до 80 % от их стоимости [63, 103, 121].

Анализ существующих подходов и методов по поддержанию в рабочем состоянии сельскохозяйственной техники показал, что повторное использование восстановленных деталей является на сегодняшний день основным направлением обеспечения работоспособности производственного оборудования.

При осуществлении ремонтных работ 88-90 % деталей теряют не более 1 % своей исходной массы, а износ составляет 0,3-0,5 мм [65, 81, 99, 172]. Вследствие приведенных статистических данных наиболее эффективным и экономичным способом ремонта и восстановления деталей является нанесение покрытий [23, 28, 101, 109, 112, 141]. Стоит отметить, что при недостаточном финансировании АПК и при значительной изношенности сельхозтехники и специального оборудования, значение восстановления деталей

с помощью нанесения покрытий значительно возрастает. Согласно направлению и задачам государственной промышленно-экономической политики Российской Федерации (РФ) объемы восстановления необходимо увеличить до 40 % от поставки новых запчастей и при этом обеспечить снижение затрат на ремонтные работы на 10 млрд. руб. в год [70, 93].

Согласно данным Фонда развития промышленности в РФ планируется использование 80-90 % транспортных устройств за пределами сроков службы. Это потребует инновационного подхода в области восстановления и повышения ресурса деталей машин. Установлено, что при осуществлении ремонтных работ транспортирующих шнековых конвейеров, ресурс новых запасных частей составляет 50-60 % от ресурса, заявленного в технической документации [170].

Из анализа работ [19, 36, 74] следует, что при активном использовании транспортирующих шнековых конвейеров в сельскохозяйственной отрасли ремонтные работы осуществляются не меньше 3-4 раз за все время эксплуатации. Однако, учитывая активное старение техники и оборудования, число ремонтных работ будет существенно возрастать.

Как показал анализ условий эксплуатации транспортирующих шнековых конвейеров, их работоспособность и ресурс зависят от основной детали – шнека. Необходимо отметить, что именно шнек предназначен для транспортировки груза вдоль вращающихся винтовой и цилиндрической поверхностей внутри конвейера. Вследствие данного эксплуатационного предназначения шнек транспортирующих конвейеров выходит из строя и перестает отвечать заявленным техническим характеристикам из-за высокой степени износа сплошной винтовой поверхности (реборды), а также ввиду износа его цилиндрической основы. В этом случае могут применяться два направления ремонта. Первое – замена шнека. При этом главным недостатком при данном виде ремонта является высокая цена новой детали. Причем поставщики новых запчастей для специального сельхоз оборудования и официальные дилеры заявляют большие сроки поставки ремонтного

шнека, что в свою очередь приведет к простоям производственного оборудования. Второе – восстановление изношенных поверхностей детали.

Исследования показали, что винтовая поверхность шнека подвергается активному износу, приводящему к отказу работы детали, при этом цилиндрическая поверхность вала и посадочные места вала остаются в пригодном состоянии, но со значительными дефектами от активного трения [150].

Длительная эксплуатация конвейера является одной из главных причин износа винтовой и цилиндрической поверхностей шнека, что обусловлено постоянным перемещением груза. Именно поэтому возникает необходимость в обслуживании основных узлов транспортирующего конвейера. Причем количество ремонтных и обслуживающих работ напрямую зависит от состояния рабочих поверхностей шнека, что для производства весьма невыгодно ввиду большого количества проводимых обслуживающих мероприятий и выделяемых финансовых средств на их осуществление. Следовательно, для повышения ресурса транспортирующего конвейера требуется повышение износостойкости винтовой и цилиндрической поверхностей главного рабочего органа – шнека, примерно в 1,5-3 раза. Если учесть, что цена восстановленной детали приблизительно в 1,95 раза меньше цены новой [47], то его восстановление является приоритетным направлением снижения затрат на ремонт и техническое обслуживание [70].

Анализируя выше представленные научные работы, посвященные восстановлению и ремонту сельскохозяйственной техники и специального оборудования, был сделан вывод, что актуальным и экономически оправданным направлением повышения износостойкости поверхностей деталей машин является нанесение композитных материалов на детали машин с помощью газотермических технологий напыления, в частности плазменного напыления.

Технологические процессы по восстановлению агропромышленного и специального оборудования с помощью плазменного напыления были апробированы и по итогу внедрены на предприятия и цеха, приоритетным направлением которых является ремонт и восстановление машин и механизмов.

В таблице 1.1 представлены статистические данные по технологическим способам восстановления деталей устройств в ремонтном цеху одного из строительного-монтажных предприятий АПК в городе Воронеж.

Таблица 1.1 – Данные по технологическим способам восстановления деталей

Технологический процесс (по способам восстановления)	Доля в общем количестве, %
Дуговая наплавка	65
Плазменное напыление	6
Приварка металлического слоя	10
Нанесение гальванических покрытий	9
Прочие	10

В отличие от большинства применяемых технологий процесс плазменного напыления применим для деталей с различными габаритными и геометрическими параметрами, кроме того весьма экономичен и прост в использовании, и при этом не способствует возникновению пространственного коробления детали.

1.1 Особенности условий работы шнеков и факторы, определяющие их износостойкость

Как показывает практика [51, 150], применение транспортирующих шнековых конвейеров (рисунок 1.1) в агропромышленном комплексе на сегодняшний день весьма актуально, в виду их высокой эффективности и ремонтпригодности. При этом условия их работы напрямую зависят от физико-механических свойств транспортируемых материалов.

Зачастую шнековые транспортирующие конвейеры применяются в комплексной механизации технологических процессов и транспортных операций [19, 36, 47, 51, 83]. Данный вид конвейеров используется в следующих отраслях промышленности: строительная, химическая, пищевая, сервисного обслуживания, коммунальное хозяйство, легкая промышленность и сельское хозяйство. В большинстве из приведенных отраслей промышленности данный вид конвейеров эксплуатируется для осуществления транспор-

тировки различных абразивных смесей, таких как дубленные отходы, известь, химикаты и т.д.



Рисунок 1.1 – Примеры исполнения и эксплуатации шнековых транспортирующих конвейеров в сельском хозяйстве

Самое широкое применение шнековые транспортирующие конвейеры нашли в сельском хозяйстве, в частности при транспортировке зерновых культур, абразивных порошковых смесей различных фракций и плотности, сыпучих материалов и химических порошкообразных элементов.

В частности, для транспортировки зерна, а также продуктов, полученных после его переработки, непосредственно на предприятиях АПК используют такие винтовые конвейеры как: У13-БКШ, БКВ, УКВ 1 L10, УКВ, СВТ, КВЦ300, У9-УКВ (в желобе) и т.д. Стоит отметить, что шнек также активно используется на таких устройствах, как: самоподаватель шнековый передвижной УСВ, самоподаватель шнековый передвижной УСШ, разгрузчик «Хоппера» РХ-61, шнек-дозатор с ворошителем ШДС-200-2,5, транспортер передвижной винтовой КВП-60, транспортер шнековый передвижной ТПШ-3М и т.д. В подавляющем большинстве у всех перечисленных машин и механизмов используется крупногабаритный шнек с шагом более 120 мм.

Транспортировка порошковых материалов различной фракции и плотности требует выполнения больших объемов транспортных и погрузочных операций. На одну тонну порошковой абразивной смеси приходится от 7 до 9 тонн погрузочно-транспортных работ. Следовательно, на процессы транспортировки порошковых материалов затрачиваются огромные трудовые и материальные ресурсы.

В ряде научных работ [51, 55, 64, 74, 83, 150] наиболее распространенной причиной эксплуатационных отказов машин в большинстве случаев является износ и повреждение рабочих поверхностей деталей механизмов. В случае с шнековым конвейером главной деталью, которая при активной эксплуатации подвергается наибольшему износу и физическому воздействию, является шнек.

Шнек обладает рядом конструкторских и технологических преимуществ, такими как компактность, простота эксплуатации и надежность, что обусловило его широкое применение в транспортирующих конвейерах.

Для подробного изучения степени износа рабочих (винтовой и цилиндрической) поверхностей шнека, проводился анализ эксплуатационных условий работы и факторов, влияющих на их износостойкость (рисунок 1.2) [54, 58, 127].



Рисунок 1.2 – Схема факторов, влияющих на износ рабочих поверхностей шнека

Алгоритм работы шнека транспортирующего конвейера включает в себя захват абразивной смеси в загрузочном механизме, перемещение абразива внутри кожуха и разгрузку в разгрузочном механизме. При этом перемещаемый груз (абразив) меняет характер движения. При перемещении абразива различной плотности, фракции и массы по рабочим поверхностям шнека, возникает пара трения «абразивная смесь-шнек», и в результате этого взаимодействия происходит значительный износ рабочих поверхностей [155].

В работе [146] охарактеризован процесс трения и износа детали, который включает в себя следующие факторы: входные, внутренние и выходные. При проведении исследований по оценке и определению силы трения в данной работе [146] определена необходимость в учете приведенных факторов, образующихся при трении рабочих поверхностей шнека и абразивной смеси, поскольку фрикционная пара «абразивная смесь-шнек» обладает собственными характеристиками и физико-механическими свойствами, которые влияют на величину силы трения и интенсивность изнашивания.



Рисунок 1.3 – Факторы, влияющие на износ поверхности шнека

По итогу анализа работ [94, 97, 146] составлена схема (рисунок 1.3), позволяющая понять, какие факторы оказывают влияние на величину степени износа рабочих поверхностей детали при их трении с абразивным материалом таким как, например, зерновые культуры или порошок.

1.1.1 Особенности условий работы и виды износа рабочих поверхностей шнеков

Известно [97, 146, 150, 162], что при транспортировке абразивных смесей в шнековом конвейере возникают такие виды изнашивания, как: механическое, коррозионно-механическое и термомеханическое и т.д. (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Основные виды изнашивания

Для оценки величины изнашивания необходимо учитывать контакт и вид изнашивания. В работах [96, 176] был классифицирован возникающий при трении контакт: микрорезание, упругий контакт, пластический контакт, адгезионное взаимодействие, когезионный отрыв.

Микрорезание происходит при условии, если контактные напряжения при транспортировке абразива достигают предельных (разрушающих) значений, а именно когда идет нарушение режима обтекания рабочей поверхности шнека абразивной смесью. Как правило, разрушение в данном случае происходит при первом же контакте абразива и рабочей поверхности.

Упругий контакт имеет место в тех случаях, когда адгезия не приводит в зоне контакта к напряжениям, которые превышают предел текучести. Данный вид износа происходит при многократном контакте рабочих поверхностей шнека и абразивной смеси.

Пластический контакт имеет место в тех случаях, когда контактные напряжения достигают предела текучести и абразив обтекает внедрившиеся выступы на рабочей поверхности шнека.

Адгезионное взаимодействие по своей природе лишь сопутствует усталостным процессам. При этом происходит прилипание пленок, покрывающих поверхность шнека.

Когезионный отрыв отмечается при непосредственном контакте транспортируемого абразивного материала и рабочих поверхностей шнека. При больших скоростях транспортировки абразивного материала (высоких оборотах вращения шнека) повышается степень ударных нагрузок на рабочих поверхностях детали, что в итоге приводит к отслаиванию и вырыванию материала с верхних слоев материала. По итогу многочисленные когезионные отрывы нарушают целостность рабочих поверхностей шнека, что приводит к некорректной работе транспортирующего конвейера в целом.

На основе проведенного анализа контактов при трении был сделан вывод, что износ шнека транспортирующего конвейера характеризуется пластической деформацией поверхностных слоев металла, химическим взаимодействием с различными элементами внешней среды [33], тепловыделением ввиду плотного контакта транспортируемой абразивной смеси (порошок, зерновые культуры и т.д.) и рабочих поверхностей шнека, а также образованием и разрушением пленок окислов.

В зависимости от механического состава транспортируемой абразивной смеси, роль которой обычно выполняют промышленные порошки или зерновые культуры, шнек изнашивается по толщине, ширине, длине, затупляется, изгибается и в итоге ломается [51, 55, 64, 74, 83, 150, 162]. При этом с повышением температурных показателей в зоне контакта абразивных включений и рабочей поверхности шнека, величина износа значительно увеличивается.

В ходе эксплуатации конвейера происходит постепенное ухудшение физико-механических и эксплуатационных свойств материала, из которого изготавливаются транспортирующие шнеки, рост динамических и термических напряжений. В результате происходит процесс активного абразивного износа рабочих поверхностей детали, что приводит к возникновению поломки конвейера и понижению его работоспособности.

1.1.2 Абразивный износ и факторы, определяющие износостойкость рабочих поверхностей шнеков

На сегодняшний день серийные шнеки для транспортирующих конвейеров изготавливают из сталей 20Х, 65Г, 45 и т.д., которые в закаленном состоянии имеют твердость 37-43 HRC и удовлетворительные показатели относительного удлинения $\delta = 6,5-7,2 \%$, но небольшой предел прочности $\sigma_B = 880-1080$ МПа [33, 91]. Тем не менее величины данных технологических характеристик сталей в полной мере не обеспечивают высокий ресурс эксплуатации шнеков. Следовательно, возникает необходимость в упрочнении шнека путем термической или механической обработки рабочих поверхностей шнека либо нанесением функциональных покрытий, обеспечивающих повышенную износостойкость.

Из проведенного анализа научных работ [83, 88, 89, 90, 91, 162] следует, что наиболее распространенным видом изнашивания шнеков транспортирующих конвейеров является абразивное. При этом возникает высокая

степень концентрации контактных напряжений, что подвергает поверхностный рабочий слой шнека интенсивному разрушению [55].

Как показал статистический анализ, износ рабочих поверхностей шнека приведенной группы оборудования варьируется от 0,1 мм до 5 мм. Нарботка основных узлов и деталей до замены, а также результаты технико-экономического анализа составных узлов транспортирующего конвейера приведены в таблицах 1.2 и 1.3.

Таблица 1.2 – Перечень быстроизнашиваемых деталей конвейеров

№ п/п	Основные детали	Предельный эксплуатационный ресурс, час	Назначенный заводом предельный ресурс, час	Вид износа
1.	Шнековый вал и винтовая поверхность винтового конвейера	166-170	350	Абразивный
2.	Шнековый вал и винтовая поверхность пневматического винтового насоса	147-153	350	
3.	Шнековый вал и винтовая поверхность брикет-пресса	140-164	350	

Таблица 1.3 – Результаты технико-экономического анализа составных узлов транспортирующего конвейера

№ п/п	Узлы транспортирующего конвейера, подвергаемые износу	Период эксплуатации, час	Продолжительность монтажа, час	Средняя себестоимость детали (узла), тыс. руб.
1.	Мотор-редуктор	8 500	0,5-0,75	10 000
2.	Приводной узел	8 000	0,25-0,5	5 000
3.	Подшипниковые опоры	4 000	1-1,5	3 000
4.	Шнек	350	3-3,5	30 000
5.	Желоб с кожухом	назначенный срок службы до списания	1-2	7 000
	Патрубки загрузки и разгрузки	назначенный срок службы до списания		
6.	Консоль	назначенный срок службы до списания	0,5-0,75	4 000
			0,5-1	5 000

Из анализа работ [96, 146] следует, что характер взаимодействия абразивного материала, а именно его разнофракционных частиц, с рабочими поверхностями детали дает понимание того, какой вид абразивного износа происходит в рабочей среде трения (контакта) (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Виды абразивного изнашивания деталей машин

№ п/п	Виды абразивного изнашивания	Условия абразивного изнашивания
1.	В массе абразивных частиц	При перемещении в порошковой массе, содержащей абразивные частицы
2.	Контактно-абразивное	Сопряженных деталей при трении скольжения с абразивными частицами в контакте
		Сопряженных деталей при трении качения с абразивными частицами в контакте
3.	Гидро- и газо- абразивное	Твердыми частицами в потоке жидкости
		Твердыми частицами в потоке воздуха

Проанализировав сводные данные таблицы 1.2-1.4, сделан вывод, что винтовая и цилиндрическая поверхности шнека транспортирующего конвейера в процессе эксплуатации активно изнашиваются и подвергаются значительному механическому воздействию преимущественно за счет контакта с транспортируемым абразивным материалом.

Абразивный износ обычно составляет доли миллиметров, при этом шнек уже не может обеспечить нормальное протекание технологического процесса и должен быть заменен [65]. Для осуществления оценки величины абразивного износа шнека необходимо знать интенсивность распространения изнашивания в ходе его эксплуатации [156].

Существуют следующие виды интенсивности абразивного изнашивания: при упругом контакте абразивной смеси и шнека; при пластическом контакте; при микрорезании; интенсивность абразивного изнашивания, основанная на усталостной природе разрушения поверхности шнека. Следовательно, величина интенсивности абразивного изнашивания рабочих поверхностей шнека, а также износостойкость, в основном зависят от твердости и микротвердости поверхности, а также от объема вовлеченных в контакт трения абразивных частиц и площади их контакта поверхностью.

1.2 Существующие методы повышения срока службы рабочих поверхностей шнеков

1.2.1 Конструктивные и эксплуатационные способы повышения срока службы рабочих поверхностей шнеков

Конструктивными недостатками шнековых конвейеров являются: высокий удельный расход и выделение энергии при транспортировке абразивных фракций, истирание и измельчение материалов и повышенный износ рабочих поверхностей транспортирующего шнека.

В работе [20] в ходе экспериментальных исследований доказано, если спираль установлена под углом $10-15^\circ$ вниз по отношению к сердечнику шнека, то его производительность повышается на 40-50 %, а изнашивание поверхности шнека имеет равномерный характер износа.

В работе [126] увеличение срока эксплуатации шнеков конвейеров достигается за счет внедрения в их конструкцию дополнительного механизма, такого как пневмовинтовая установка с устройством для удаления легких примесей из транспортируемых материалов. За счет разработки и внедрения данной установки автор разработал аналитические зависимости производительности, мощности и энергоемкости транспортирования порошковых смесей, а также производительности выделения легких примесей.

Однако внедрение пневмовинтовой установки в конструкцию шнекового конвейера приведет к серьезному удорожанию всего устройства, также возникнет необходимость в обеспечении дополнительных ремонтных мероприятий пневмовинтовой установки и конвейера в целом.

В работе [169] исследовались взаимодействия транспортируемого абразивного материала с внесенным в конструкцию конвейера оребренным кожухом. Проводился анализ влияния числа заходов ребра установленного кожуха на производительность и срок службы шнекового конвейера, а также рассматривалась возможность по модернизации общей конструкции.

Проанализировав результаты работ [20, 88, 89, 90, 91, 126, 169], сделан вывод, что в рамках серийных сельхоз производств использование классических транспортирующих шнековых конвейеров занимает оправданное первостепенное место, а внедрение модифицированных устройств и механизмов на данный момент экономически нецелесообразно.

По итогам проведенного анализа установлено, что на данный момент в сельскохозяйственном производстве надежнее и выгоднее использовать технологические способы по повышению срока службы рабочих поверхностей шнека, что существенно увеличит срок эксплуатации конвейеров АПК.

1.2.2 Технологические способы повышения срока службы рабочих поверхностей шнеков

Из анализа научных работ [28, 52, 64, 65, 123] следует, что для достижения высоких показателей эксплуатационных характеристик транспортирующего шнека широко применяются технологические способы нанесения функциональных покрытий на рабочие поверхности детали. Обобщенная классификация способов восстановления и упрочнения изношенных поверхностей деталей представлена на рисунке 1.5.

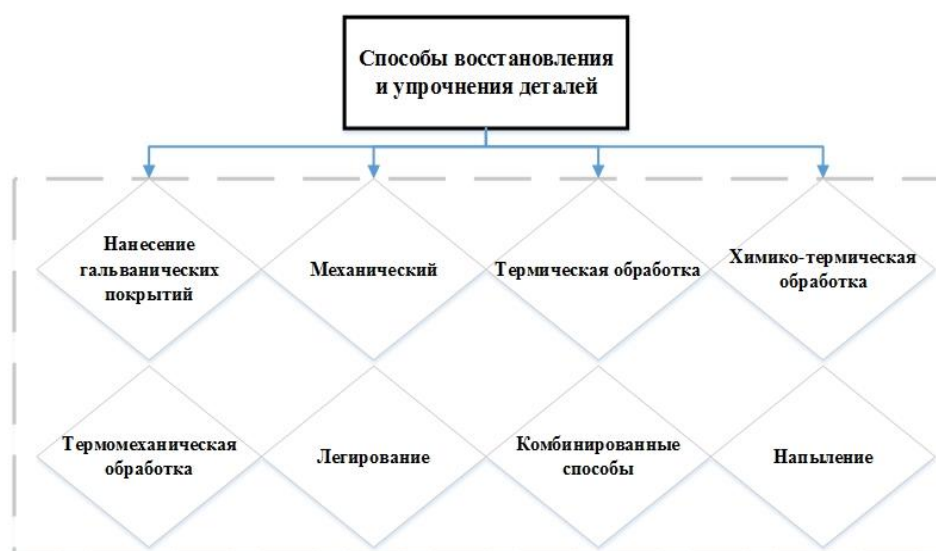


Рисунок 1.5 – Способы восстановления и упрочнения деталей

Нанесение гальванических покрытий. Гальванические покрытия, которые наносятся за счет электро- и химического осаждения, отличаются высокой прочностью сцепления между наносимым покрытием и обрабатываемой поверхностью детали, а также позволяют получать поверхности из широкого спектра композитных материалов [73]. Гальванические покрытия по своим эксплуатационным свойствам отличаются высокой термостойкостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью [61, 68].

Гальванические покрытия при всех их преимуществах обладают необходимой прочностью и износостойкостью только при малой их толщине, поэтому не могут использоваться для восстановительных операций сложнопрофильных поверхностей деталей.

Электроискровое легирование. Технология электроискрового легирования (ЭИЛ) основана на формировании слоев материала с большим диапазоном физико-химических свойств, варьируя электрическими режимами [71]. Технология ЭИЛ обеспечивает повышение твердости, коррозионной стойкости, и прочих триботехнических характеристик детали и её рабочих поверхностей.

Недостатком ЭИЛ является высокая шероховатость нанесенного слоя. Кроме того, процессы нагрева в зоне импульсного разряда являются главной причиной образования в наносимых слоях остаточных напряжений, что влечет за собой снижение усталостной прочности.

Лазерная обработка (наплавка). Технология нанесения покрытия лазерной наплавкой основана на нанесении функционального материала на поверхность детали с применением высококонцентрированного потока энергии – лазерного луча [117]. Главные преимущества данной технологии: обеспечение точно назначаемого количества энергии, вводимой на поверхность обрабатываемой детали, отдельная регулировка нагрева и плавления основного и присадочного наносимых материалов.

Однако для применения лазерной обработки необходимо специальное дорогостоящее оборудование и проведение большого числа экспериментальных исследований по подбору материала нанесения, что связано с вероятно-

стью формирования покрытий с высокой усталостной прочностью и остаточными напряжениями.

Наиболее распространенными способами нанесения материала с заданными эксплуатационными свойствами являются газотермическая наплавка и напыление [64, 98, 141]. Наплавка и напыление преследуют две технологические цели: восстановление геометрии и габаритных размеров детали, а также нанесение поверхностного слоя со специальными эксплуатационными свойствами с целью продления срока службы механизма.

Рассмотрим способы наплавки деталей специального сельскохозяйственного оборудования, которые чаще всего применяются в ремонтных сервисах и цехах.

Наплавка покрытыми электродами. Данный технологический процесс наплавки ведется на постоянном токе обратной полярности [28, 39, 112, 121]. Преимущества наплавки покрытыми электродами: нанесение наплавляемого материала без ограничений толщины покрытия и отсутствие ограничений по габаритным размерам наплавляемых поверхностей деталей.

Недостатки наплавки покрытыми электродами: отсутствие контроля качества и свойств наплавленного слоя из-за попадания в него элементов материала обрабатываемой детали; значительная деформация поверхности обрабатываемой детали за счет высокой энергии наплавки; неконтролируемость кинематики процесса, что приводит к неравномерному нанесению наплавляемых материалов на поверхность детали; трудность наплавки мелкогабаритных деталей [53].

Дуговая наплавка электродом в аргоне. В качестве источника питания используются специальные установки, оснащенные осциллятором для бесконтактного возбуждения дуги [53, 79]. В качестве защитного газа используется аргон. В качестве электродов применяются вольфрамовые прутки. Преимущества: возможность получать наплавленный слой за счет химического состава присадочного прутка. Недостатки: низкая производительность, сложность и дороговизна оборудования для осуществления наплавки.

Автоматическая наплавка. Выполняется сплошной проволокой, порошковой проволокой или лентой. Данная технология обладает большой производительностью, по сравнению с выше перечисленными способами. Применение в данной технологии порошковых материалов существенно повышает диапазон легирования [53, 79, 121]. Преимущества автоматической наплавки: высокая производительность процесса, процесс наплавки не требует высокой квалификации рабочего. Недостатки: высокая стоимость оборудования, непригодность для наплавки изделий сложной формы.

Проанализировав основные виды наплавки материала на поверхности обрабатываемой детали, сделан вывод, что все приведенные технологии обладают такими недостатками, как сложное и дорогостоящее оборудование, дефицитные исходные материалы, низкое качество получаемого покрытия. Кроме того, существенным недостатком всех видов наплавки является сильное искажение геометрии детали [144].

Практически во всех способах восстановления и упрочнения изношенных поверхностей деталей применяются композитные материалы. На сегодняшний день композитные материалы являются перспективными с точки зрения повышения ресурса деталей машин [18, 25, 109, 110]. Но их применение сопряжено с трудностями, такими как подбор состава порошка с необходимыми функциональными свойствами для конкретной детали.

На современном этапе недостаточно теоретических положений о формировании износостойких композитных покрытий на поверхностях деталей машин, а также рекомендаций по конструкторско-технологическому обеспечению их нанесения. На данный момент наиболее перспективными в плане получения качественных функциональных покрытий из композитных материалов являются газотермические способы и методы напыления.

Основными способами газотермического воздействия на поверхности деталей машин являются: плазменное напыление, газопламенное напыление, дуговая металлизация, детонационно-газовое напыление и т.д.

Характерной чертой этих способов нанесения покрытий является отсутствие расплавления металла основы или минимальная степень его оплавления. Способы газотермического напыления отличаются более высокой производительностью по сравнению с наплавкой, диффузионным насыщением и электроосаждением [28, 73, 99, 112, 141].

Некоторые авторы [107, 145] предлагают использование технологий, которые способны повысить прочность сцепления покрытия с основой (адгезию) на базе порошков ПГ-СР2, ПГ-СР3, ПГ-СР4 и др. до 218-246 МПа (ГОСТ 21448-75).

Однако, это достигается введением дополнительных приемов термического воздействия на наплавляемую поверхность, что ведет к возникновению термических деформаций и пространственному короблению деталей. Сами авторы отмечают, что данный способ применим только к массивным объемным деталям, способным к рассеянию теплового потока. В частности, винтовая поверхность шнека представляет собой тонкий лист, приваренный к валу. Соответственно, данные технологии с дополнительным термическим воздействием не могут использоваться для восстановления и упрочнения рабочих поверхностей шнека.

На сегодняшний день АПК при осуществлении восстановления и ремонта специальной техники активно применяются технологии газотермического упрочнения.

Учитывая технико-экономический сравнительный анализ способов восстановления и упрочнения деталей машин (таблица 1.5) [38, 87], сделан вывод, что актуальной технологией для восстановления изношенных поверхностей шнека транспортирующего конвейера является плазменное напыление.

Плазменное напыление является логическим развитием электродуговой металлизации. Используя основу данной технологии, а именно плазму, возможно наносить функциональное покрытие практически из всех известных материалов, в том числе из порошковых композитов.

Таблица 1.5 – Технико-экономический анализ способов восстановления деталей

Характеристика способа	Сварка	Закалка	Наплавка	Напыление
Толщина обрабатываемой детали, мм	0,5-10	≥ 3	≥ 2	любая
Прочность сцепления покрытия с основой	-	-	высокая	пониженная
Интегральная температура основы, °С	высокая (200-1000)	низкая (200-300)	высокая (200-1000)	низкая (100-200)
Термическая деформация детали	пониженная	есть	есть	нет
Структурные изменения основы	есть	есть	значительные	нет
Пористость покрытия	-	-	нет	есть
Сохранение шероховатости поверхности	-	да	нет	нет
Повышенная твердость поверхности	-	да	да	да
Износостойкое покрытие	-	да	да	да
Жаропрочное покрытие	-	-	да	да
Диэлектрическое покрытие	-	-	да	да
Сохранение высокой твердости основы	нет	да	ограниченная	да
Проведение техпроцесса автоматически или вручную	да	только автоматически	да	да

Именно с помощью плазменного напыления возможно провести экспериментальный подбор состава композитного материала для напыления, а также разработать рекомендации по назначению рациональных технологических режимов напыления полученного композита.

1.3 Восстановление рабочих поверхностей плазменным напылением

Технология плазменного напыления является экономичной, универсальной и перспективной для создания и нанесения разнообразных высококачественных покрытий [142, 158].

Отличительными характеристиками технологии плазменного напыления от других способов и методов газотермической обработки деталей являются: температура и мощность дуги. Варьирование указанными технологическими параметрами позволяет наносить материалы функциональных

покрытий различной фракции.

Процесс плазменного напыления поверхностей деталей машин представлен на эскизе, который изображен на рисунке 1.6.

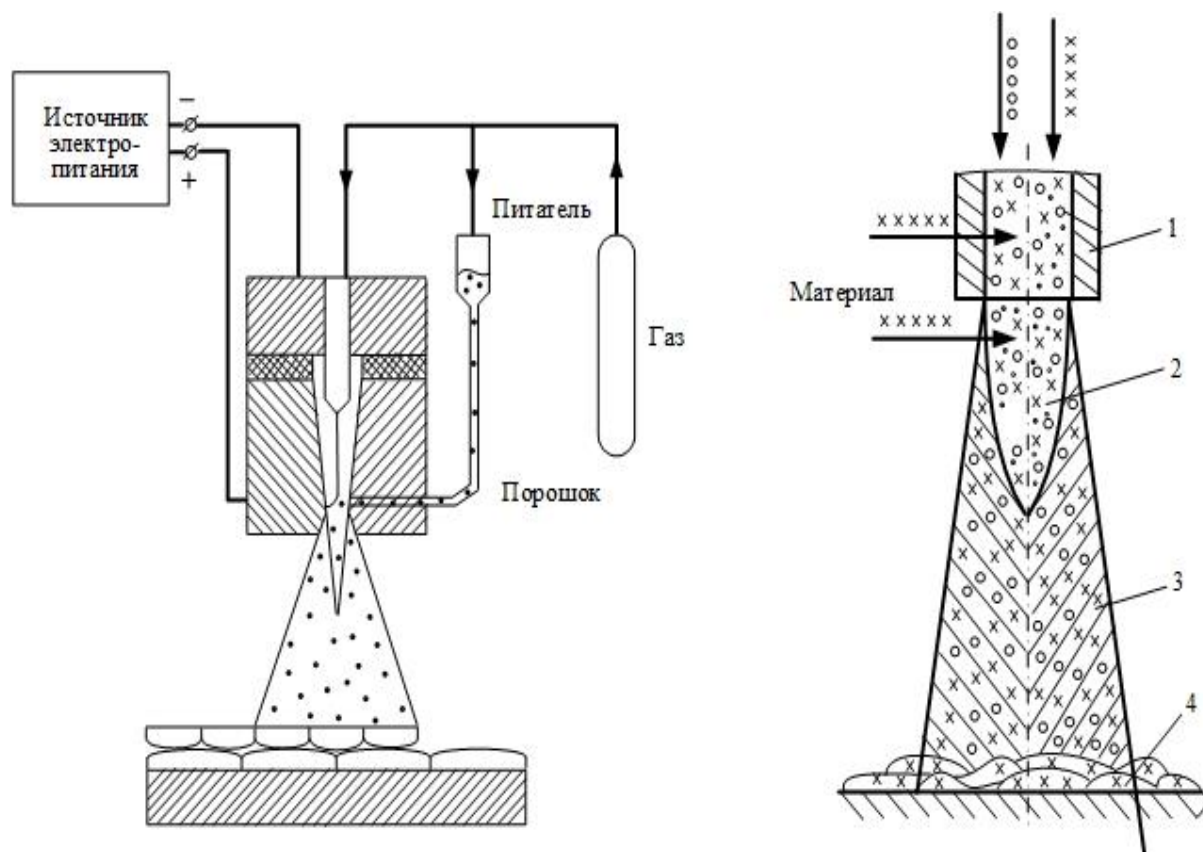


Рисунок 1.6 – Общая схема плазменного напыления

1 – сопло; 2 – ядро плазменной струи;

3 – основной участок плазменной струи с напыляемым материалом;

4 – формируемое покрытие

Между охлаждаемыми катодом и анодом от источника питания образуется электрическая дуга. В зависимости от конструкции плазмотрона и технических задач по получению покрытия величину тока можно регулировать. В дуговой промежуток подается плазмообразующий газ.

Физико-химические характеристики плазмообразующих газов приведены в таблице 1.6 [78, 132, 167].

Таблица 1.6 – Физико-химические характеристики плазмообразующих газов

Характеристика	Водород	Азот	Аргон	Гелий
Атомная или молекулярная масса	2,016	28,0016	39,94	4,0024
Плотность при 0 °С и 760 мм рт. ст., кг/м ³	0,084	1,2505	1,783	0,1785
Вязкость при 20 °С и 760 мм рт. ст., мкпз	88	170	221	196
Теплоемкость при 20 °С и 760 мм рт. ст., кал/кг °С	3,408	0,250	0,125	1,251
Коэффициент теплопроводности при 0 °С и 760 мм рт. ст., Мкал/ч·м °С	150	20,9	14	130
Потенциал ионизации, В: однократный двукратный	13,5	14,5 29,4	15,7 27,5	24,5 54,1
Энтальпия плазмы, ккал/кг	76600	9950	4670	5110
Температура плазмы, °С	5000	7200	14000	20000
Напряжение дуги, В	62	60	40	47
Энергия, подводимая к дуге, кВт	120	65	48	50
Коэффициент использования энергии на нагрев газа, %	80	60	40	48
Коэффициент теплоотдачи от плазмы к частице материала, %	26	3	0,9	0,9

За счет того, что технология плазменного напыления позволяет в больших диапазонах изменять технологические параметры нанесения покрытий, то появляется возможность варьировать свойства формируемых покрытий [23, 64, 82, 101, 141, 142]. Основные технические показатели плазменного напыления представлены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Основные технические показатели плазменного напыления

Метод нанесения покрытия	Темпер. струи, К	Нагрев подложки, °С	Скорость струи, м/с	Скорость частиц, м/с	Адгезия, МПа	Толщина покрытия, мм
Плазменное напыление (воздух)	3000... 12000	300...500	200...2500	40...250	15...100	0,1...50,0
Плазменное напыление (Ar-N ₂)	6000... 20000	300...400	800...1400	40...120	20...80	0,1...50,0

Опираясь на результаты работ [26, 82, 142], выделены следующие преимущества плазменного напыления: нанесение покрытия на поверхность

детали из любого материала; нанесение покрытия на локальные поверхности; отсутствие ограничений в габаритных размерах деталей; возможность нанесения многослойных и многорядных композитных покрытий; положительное влияние на усталостную площадь основы; технологичность процесса; минимальные припуски; высокая производительность; возможность автоматизации процесса.

К недостаткам технологии следует отнести низкую прочность сцепления покрытия с основой и высокую пористость нанесенного покрытия.

В работе [141] отмечается, что плазменное напыление металлических покрытий с использованием плазмотронов с фиксированной длиной дуги в аргоне и с потоком фокусирующего газа при высокой стабильности процесса и меньшем шуме обеспечивает повышенную прочность сцепления покрытия с основой, а также минимальную пористость покрытия, что по итогу анализа технологий повышения эксплуатационных свойств поверхностей деталей делает плазменное напыление уникальной технологией.

Однако с изменением длины дуги в аргоне при напылении сложнопрофильных поверхностей шнека приведенные недостатки вновь становятся актуальными.

В работе [173] установлено, что защитные покрытия из металлокерамических порошков Ti-C-Ni-Cr, сформированные технологией плазменного напыления, обладают высокой пористостью и шероховатостью. Для устранения данных недостатков автор работы применил импульсную электронно-пучковую обработку. Последующее применение указанной технологии обеспечило снижение пористости и шероховатости сформированного покрытия.

Тем не менее применение последующей импульсной электронно-пучковой обработки существенно повышает стоимость применяемых технологий. Применение данной технологии после плазменного напыления понижает существующий уровень прочности сцепления покрытия с основой [167].

Автором работы [33] было установлено, что у металлизационных покрытий после проведения упрочнения плазменным оплавлением повыша-

ется такая физико-механическая характеристика как износостойкость, примерно в два раза по сравнению с покрытиями подобного химического состава. Как оказалось, это связано с полным окислением Al и Ti, что привело к формированию композиционного покрытия с упрочнением дисперсными карбидами хрома.

Последующая металлизация не обеспечивает повышения прочности сцепления покрытия с основой. Причем применение металлизации композитных покрытий может привести к повышению пористости из-за смещения слоев материала ввиду различных температур плавления многокомпонентного состава и, следовательно, к повышению шероховатости.

В результате изучения представленных выше работ и анализа технологических и конструкторских особенностей плазменного напыления, возможными способами по устранению приведенных недостатков могут выступать: подбор рационального состава композитного материала с целью повышения износостойкости рабочих поверхностей детали, и назначение рациональных технологических режимов напыления для конкретных типов восстанавливаемых деталей и наносимого функционального материала.

Проведя анализ особенностей технологии плазменного напыления, сделан вывод о её целесообразности использования для восстановления изношенных поверхностей детали (шнека), а также для повышения износостойкости её рабочих поверхностей за счет разработки нового композитного материала напыления и назначения рациональных технологических режимов с учетом геометрических особенностей восстанавливаемой детали.

1.3.1 Факторы, определяющие прочностные свойства износостойких покрытий

Планирование нанесения композитного покрытия на поверхность шнека с целью восстановления его рабочих поверхностей представляет собой последовательность технологических стадий:

стадия подготовки поверхности для напыления;

стадия нанесения покрытия.

Причем каждая стадия напыления детали обладает определенным количеством факторов, в разной степени оказывающих влияние на свойства формируемого покрытия, в том числе и на прочностные характеристики [26, 28, 63, 141]. Детальное изучение структурно-следственной связи факторов и критериев процесса плазменного нанесения подробно изучена и проанализирована в работе д.т.н., профессора Кадырметова А.М. [80].

Качество нанесенного покрытия плазменным напылением характеризуются [166]:

прочностью сцепления покрытия с основой;

когезией;

пористостью материала;

толщиной покрытия;

уровнем остаточных напряжений.

При изучении технологии плазменного напыления в работах [24, 33] выделяют два контура формирования качественного износостойкого покрытия: внутренний и внешний.

Внутренний контур включает в себя параметры напыления:

технологические режимы;

энергетические параметры процесса;

расход напыляемого материала.

Внешний контур включает в себя:

дистанцию напыления;

температуру подложки;

условия охлаждения;

кинематические режимы напыления;

энергетические характеристики формообразования покрытия.

Изучение научных работ в области газотермического напыления [24, 98, 141, 142] позволило оценить влияние факторов на прочностные свой-

ства покрытий сформированных с помощью плазменного напыления. Схема влияния различных факторов на параметры качества сформированного покрытия приведена на рисунке 1.7. [165].

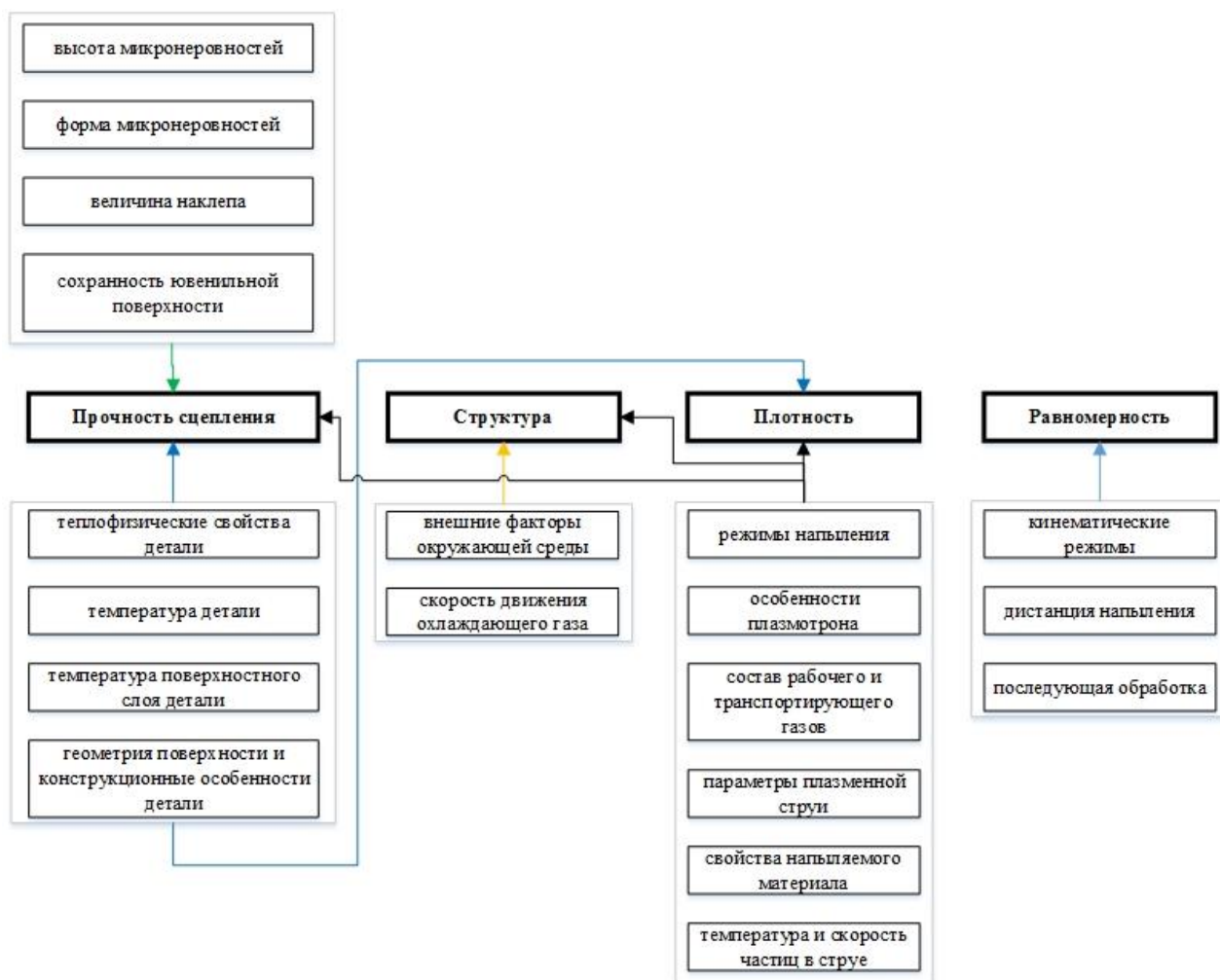


Рисунок 1.7 – Схема влияния факторов на качество покрытия

Для оценки реального влияния факторов на прочностные свойства покрытия к дальнейшему анализу приняты только внутренние факторы покрытия: адгезионная прочность, твердость, шероховатость и толщина покрытия [155]. Схема влияния параметров и режимов плазменного напыления на технологические параметры покрытия приведена на рисунке 1.8.



Рисунок 1.8 – Влияние параметров и режимов плазменного напыления на технологические параметры покрытия

На основе проведенного анализа и разработанных схем, представленных на рисунках 1.7 и 1.8, выделены основные факторы, влияющие на качество, и прочностные свойства покрытий плазменного напыления:

- качественная подготовка поверхности для нанесения покрытия;
- подбор рационального композитного состава материала для напыления;
- точное назначение технологических режимов процесса напыления.

1.3.2 Анализ методов повышения качества износостойких покрытий

Из практики известно [26, 33, 92, 59], что качество покрытий зависит от ряда элементов: качество оборудования для плазменного напыления; качество подготовки поверхности детали для напыления; качество наносимого материала; качество рабочих газов и т.д.

Изучение и анализ результатов работ [24, 79, 80, 141] дали понимание о том, что существуют режимные, кинематические и внешние управляющие воздействия, оказывающие влияние на качество формируемого покрытия при плазменном напылении.

Исходя из выше перечисленных управляющих воздействий, контроль и управление качеством плазменных покрытий осуществимы путем регулирования технологических режимов напыления.

Основным показателем, определяющим качество покрытия, является прочность сцепления покрытия с основой. Неудовлетворительная прочность сцепления может быть следствием следующих причин [100]: некачественная подготовка к процессу напыления (состояние поверхности детали, качество напыляемых материалов, качество и функциональные возможности оборудования для напыления); наличие конденсата на поверхности детали; низкая совместимость подложки и наносимого материала в температурных условиях напыления.

На рисунке 1.9 представлены основные способы повышения величины прочности сцепления нанесенного слоя с подложкой [100].

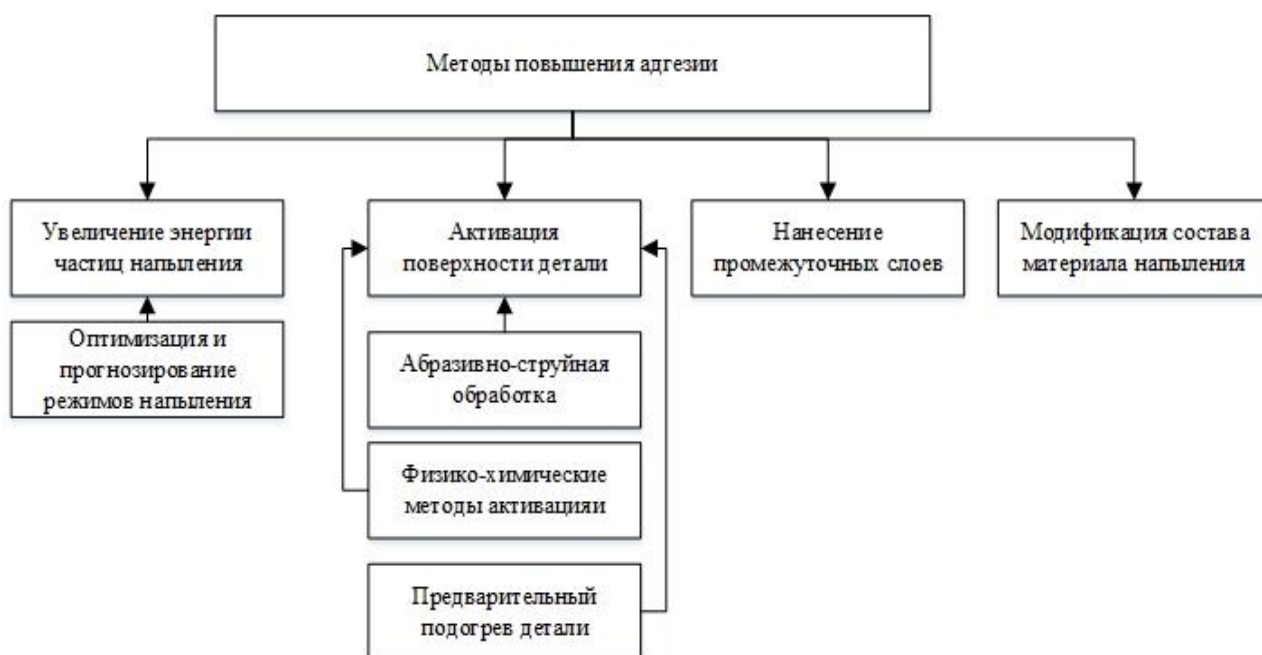


Рисунок 1.9 – Методы повышения прочности сцепления

Стоит отметить, что с увеличением мощности, подаваемой на плазменную струю, размеры элементов сформированного покрытия начинают уменьшаться, что сопровождается образованием нанокластеров, однако при увеличении времени обработки (напыления) детали размеры структурных элементов покрытия начинают увеличиваться [168].

Тем не менее с увеличением мощности источника напыления сложно спрогнозировать изменения физико-механических параметров композитного материала, из которого формируется покрытие. Увеличение мощности источника напыления может привести, как и к улучшению качества поверхностного слоя покрытия, так и к его ухудшению, особенно по показателям шероховатости, когезии и прочности сцепления покрытия с основой.

В работе [122] проводились исследования по получению соотношения параметров процесса плазменного напыления с наложением ультразвука. По результатам работы были получены необходимые свойства покрытия. При этом однородность микрорельефа сформированного покрытия возросло в несколько раз по сравнению с идентичными нанесенными покрытиями тем же технологическим способом.

Однако в данной работе не рассматривалось влияние ультразвука на прочность сцепления покрытия с основой. Также стоит отметить, что при наложении ультразвука при плазменном напылении необходимо проводить уточненный расчет кинематических режимов процесса, прогнозирование углов отклонения плазменной струи от траектории движения инструмента, а также определение номинального расположения источника распространения ультразвуковых волн.

В работе [92] был исследован комбинированный способ нанесения защитных покрытий на поверхности деталей. В частности, проводился анализ тепловых потоков при совместном плазменном и электроэрозионном упрочнении. Данный способ упрочнения был исследован с целью оценки возможности перераспределения тепловой энергии с целью повышения эксплуатационных свойств покрытия.

Всё же стоит учитывать, что при повышении толщины покрытия происходит увеличение растягивающих напряжений и уменьшение величины прочности сцепления покрытия с основой, что приводит к разрушению покрытия в ходе активной эксплуатации детали. Кроме того, при совместном электроэрозионном и плазменно-лучевом процессе [22] необходимо просчитать возможные физико-механические изменения композитного покрытия, что также весьма затруднительно.

Как отмечено в работах [25, 48, 110] часть композитных частиц напыляется на поверхность основы в непроплавленном состоянии и удерживается на поверхности детали лишь за счет пластичных частиц. Полностью расплавленные частицы оседают не только по принципу «частица-основа», но и по схеме «частица-частица». Таким образом, создание композитного покрытия сопряжено с появлением микропустот, которые в ходе формирования заполняются газом, что ухудшает свойства межслойных границ.

Причиной данного эффекта является избыточное содержание наполнителя в матрице композитного материала [178]. Следовательно, возникает необходимость в разработке алгоритма определения необходимой концентрации наполнителя в составе матрицы композитного материала с учетом процентного содержания всех остальных компонентов.

Проведя анализ существующих методов повышения качества покрытий, сделан вывод о том, что улучшение свойств материала напыления возможно лишь при комплексном подходе воздействия на технологические режимы напыления. Для повышения качества покрытий необходимо: произвести подбор рационального состава композитного материала напыления, а также назначить необходимые технологические режимы напыления.

1.3.3 Анализ методов упрочняющей обработки износостойких покрытий

Несмотря на все существующие преимущества функциональных покрытий, их слои сохраняют главные недостатки: низкая прочность

сцепления покрытия с основой, и высокая пористость покрытия [4, 18, 80, 101, 109, 142].

Выделены главные причины, приводящие к вышеуказанным недостаткам:

кинематические режимы процесса напыления назначаются без учета геометрических особенностей обрабатываемой детали;

технологические параметры напыления назначаются без должного анализа состава композитного материала напыления.

Для решения задачи по устранению низкой прочности сцепления покрытия с основой и высокой пористости широкое распространение получила последующая за напылением упрочняющая обработка нанесенного слоя [24, 100, 134].

На рисунке 1.10 приведены актуальные способы оплавления покрытий [39, 134, 144, 148, 149].

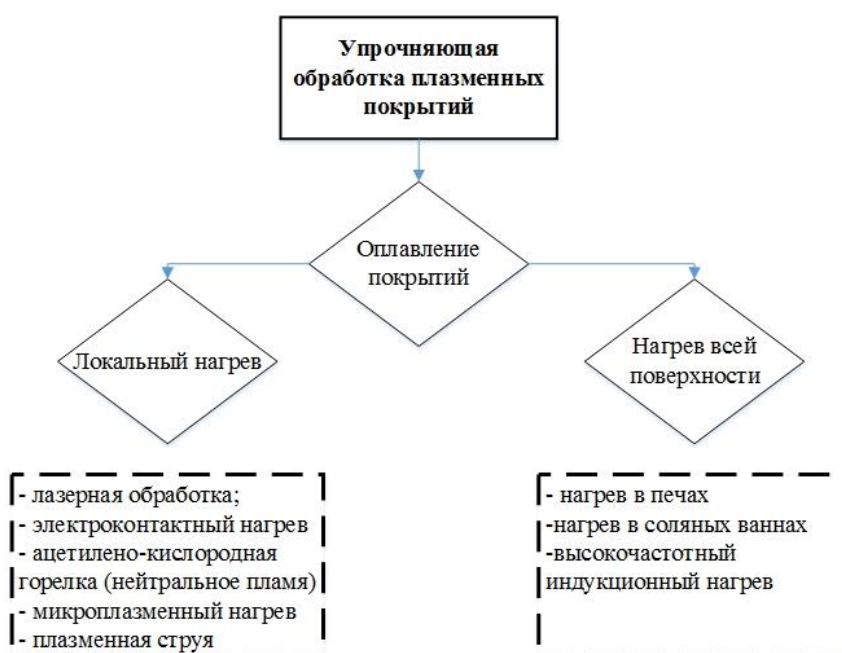


Рисунок 1.10 – Способы повышения прочности сцепления

Учитывая физико-механические свойства покрытия, а также экономический показатель процессов упрочнения, наиболее эффективным считается

использование локального нагрева поверхности детали.

Однако при использовании технологии локального нагрева покрытия возникают существенные эксплуатационные трудности, такие как:

невозможность точно определить и назначить глубину локального нагрева, поскольку толщина переходного подслоя между покрытием и поверхностью детали всегда варьируется ввиду различных температурных показателей напыления и нагрева поверхности детали [149];

высокая стоимость используемого оборудования и его сложность;

необходимость в дополнительных специальных мерах по защите обслуживающего персонала.

Использование оплавления с нагревом всей поверхности детали приводит к ухудшению структуры материала основы, а, следовательно, к снижению показателей когезии покрытия и прочности его сцепления с основой.

Из всех методов и способов упрочняющей обработки плазменных покрытий нельзя выделить тот, который решил бы проблему низкой прочности сцепления покрытия с основой и его высокой пористости одновременно.

Для устранения данных недостатков целесообразно провести исследование по следующим направлениям:

получить аналитические зависимости параметров движения плазмотрона от геометрии обрабатываемой детали;

экспериментально определить необходимую концентрацию наполнителя износостойкого композитного материала;

определить рациональные режимы нанесения покрытия.

1.3.4 Анализ методов регулирования остаточных напряжений в износостойких покрытиях

Как уже было отмечено, одним из недостатков технологии плазменного напыления является относительно низкая прочность сцепления покрытия с основой. Одной из причин данного недостатка является наличие в покры-

тии остаточных напряжений [24, 30, 98], которые по своей природе имеют знакопеременный характер (растягивающие или сжимаемые).

Причины их возникновения после формирования функциональных покрытий следующие [30, 62, 72]: различия в коэффициентах теплового расширения материала детали и наносимого покрытия; кинематические режимы напыления назначены без учета геометрии детали; усадки при кристаллизации частиц; непроработка рационального состава элементов композитного материала; деформации и наклеп частиц при столкновении с поверхностью.

Анализ работы [72] показал, что величина остаточных напряжений существенным образом зависит от режимов напыления и жесткости системы «покрытие-основа». Также причиной возникновения остаточных напряжений (растягивающих) в покрытиях является неоднородность химического состава материала напыления [13]. Остаточные напряжения, образованные в нанесенном слое покрытия, при механической обработке поверхности перераспределяются и деталь деформируется, что приводит к потере заданной точности или невозможности ее обеспечения.

На сегодняшний день к известным методам регулирования остаточных напряжений в покрытиях относятся [30, 95]: низкотемпературный отжиг, акустомеханические способы обработки, термоциклическая обработка.

При использовании низкотемпературного отжига происходит снижение общего уровня остаточных напряжений в поверхностном слое покрытия, исчезают концентраторы напряжений, а также происходит стабилизация структуры материала. Применение акустомеханического способа обработки детали оказывает значительное влияние на перераспределение дислокаций и уменьшение их плотности в зонах скопления. [111]. Термоциклическая обработка заключается в проведении циклов нагрева и охлаждения нанесенного слоя детали [17].

Указанные методы регулирования остаточных напряжений обладают существенными недостатками, такими как:

при варьировании температурных режимов нагрева и охлаждения

покрытия возможно возникновение изменений в структуре материала обрабатываемой детали, что в свою очередь приведет к увеличению показателей растягивающих напряжений, а, следовательно, и понижению прочности сцепления покрытия с основой;

при значительном термическом воздействии на покрытие происходит коробление детали;

перераспределение остаточных напряжений, а не снижение их уровня.

Проанализировав особенности режимов напыления и весь процесс нанесения функциональных покрытий в целом, был сделан вывод, что в качестве постоянных параметров используются:

среднемассовая температура частиц;

пористость покрытия;

количество используемого материала.

В качестве переменных параметров выступают:

расход наносимого материала;

движение плазмотрона относительно поверхности детали (кинематические режимы плазменного напыления).

Стоит отметить, что от точности назначения кинематических режимов напыления (скорость перемещения инструмента и вращения детали) зависит толщина и величина прочности сцепления покрытия с основой, а, следовательно, и качество покрытия. Данные параметры оказывают значительное влияние на формирование остаточных напряжений в нанесенном покрытии. Причем при планировании процесса напыления его режимы (электрический ток, напряжение, расход и состав плазмообразующего газа и т.д.) являются неизменными параметрами и подбираются экспериментально [125].

В итоге, необходимо экспериментально получить необходимую концентрацию наполнителя композитного износостойкого материала, а также провести экспериментальный подбор и назначение технологических режимов напыления для конкретного функционального композитного покрытия.

1.4 Подбор композитного материала для плазменного напыления износостойкого покрытия

1.4.1 Анализ матрицы композитных материалов, применяемых при плазменном напылении износостойких покрытий

На основе анализа работ [23, 25, 28, 100, 109, 110, 112, 121, 125, 141, 142, 144, 178] для нанесения износостойкого покрытия была выбрана технология плазменного напыления материалов, ввиду низкой стоимостью и просты технологии формирования функциональных покрытий на поверхности обрабатываемых деталей.

Как известно из работ [31, 33, 82, 173, 178], создание нового состава композитного порошка (механической смеси) характеризуется следующими особенностями:

1. При подборе состава материала покрытия следует произвести предварительной анализ химических, физических и механических свойств всех компонентов композитного порошка.

2. Учитывать фазовые переходы компонентов материала напыления в ходе формирования покрытия, беря во внимание их структурный и химический состав.

3. Учитывать величину диапазонов назначаемых технологических режимов плазменного напыления.

Все композитные материалы состоят из матрицы и наполнителей. Под матрицей понимается материал, являющийся связующим между разнородными элементами. Материал матрицы должен быть пластичным и обладать высокой прочностью сцепления. От матрицы зависят физико-механические, теплофизические, электрические и другие свойства формируемого композита.

В качестве основного материала матрицы был выбран самофлюсующийся порошок на основе никеля и хрома с флюсующими добавками бора и кремния – ПР-НХ17СР4 (17 % хрома, 4,1 % кремния, 3,6 % бора, железа

не более 5% и 1 % углерода), поскольку данный многокомпонентный материал обладает пластичной металлической матрицей, что обеспечивает необходимый уровень вязкости, и позволяет его использовать при ударных нагрузках [82, 128, 175, 178].

Порошок ПР-НХ17СР4 обладает температурой плавления – 1025 °С, тем самым при его нанесении обеспечивается низкая степень термического воздействия на деталь, низкий уровень остаточных деформаций и напряжений, что в целом обеспечивает повышенную прочность сцепления покрытия с основой. Также ПР-НХ17СР4 обладает высокой стойкостью к абразивному и эрозионному износу за счет высокопрочной фазы Cr_7C_3 .

В работе [133] производилось нанесение порошка типа Ni-Cr-B-Si-C на элементы котлов с «кипящим слоем» с помощью дозвуковой газопорошковой наплавки. Проводился подробный анализ структурных составляющих нанесенного порошка ПГ-СР4, оценивались механические свойства сформированного покрытия, а также металлографический анализ структуры полученного покрытия. Был сделан вывод, что, следуя общим рекомендациям наплавки можно получить покрытие, потеря массы которого будет 3-3,5 раза ниже, чем у эталона. Однако сформированное покрытие самофлюсующегося сплава обладает неудовлетворительной пористостью и прочностью сцепления покрытия с основой, что в значительной мере повлияет на сокращение эксплуатационного ресурса обработанной детали.

Также известна работа [147], в которой производилась обработка клапанов автомобильных двигателей с помощью нанесения порошка на хромоникелевой основе с добавлением 4 % Al, который предупреждает возникновение отдельных пор.

Тем не менее добавление в состав порошка типа Ni-Cr-B-Si-C доли Al приводит к понижению величины прочности сцепления покрытия с основой, поскольку известно [113], что основным недостатком Al при использовании в газотермических технологиях является его хрупкость и низкая механическая прочность.

В работе [167] производилось напыление порошка ПГ-СРЗ на цилиндрические поверхности штока гидроцилиндра с целью повышения коррозионной устойчивости.

Как бы то ни было, по сравнению со средой эксплуатации шнека транспортирующего конвейера в ходе работы штоков гидроцилиндра не происходит активного абразивного износа, который характеризуется хаотичными ударными нагрузками о рабочие поверхности детали.

В итоге, рассматривая применение самофлюсующегося материала ПР-НХ17СР4 типа Ni-Cr-B-Si-C, сделан вывод о том, что структурные составляющие порошка в полной мере удовлетворяют критериям, предъявляемым к материалу матрицы композитного материала. Для выбора же наполнителя, как показывает анализ вышеприведенных работ, необходимо произвести исследование по следующим направлениям:

температура плавления элементов,
износостойкость,
особенности взаимодействия с компонентами материала матрицы,
восприимчивость к ударным нагрузкам.

1.4.2 Анализ наполнителей композитного материала

Известно [113, 128, 175], что наполнитель является определяющим элементом при проведении анализа свойств композитного материала. Он является отдельным элементом, и при этом повышает качественные характеристики композитного материала.

В качестве наполнителя используют более прочное вещество [105, 125, 178]:

металлы;
порошковые;
волокна из различных материалов;
графит;

технический углерод;
силикаты;
полимеры;
нитевидные кристаллы и т.д.

Учитывая условия эксплуатации конвейера, возможные физико-механические взаимодействия и химические реакции при контакте транспортируемого материала с рабочими поверхностями шнека, сформированы требования к матричному материалу с его наполнителем:

высокая износостойкость;
сопротивление ударным нагрузкам;
высокая прочность сцепления покрытия с основой;
высокая когезия композитного покрытия.

Из работы [125] следует, что наиболее эффективными наполнителями, удовлетворяющими вышеперечисленные требования к износостойкому композитному покрытию, являются карбиды металлов.

Большая часть карбидов металлов обладает:
высокой стойкостью к окислению;
жаропрочностью;
износостойкостью.

При высоких температурах свойства карбидов металлов изменяются незначительно, поскольку они обладают хорошей теплопроводностью [167].

В таблице 1.8 приведены свойства наиболее распространённых карбидов металлов, применяемых при газотермических процессах нанесения покрытия [82, 100, 167].

Однако использование указанных карбидов может сопровождаться рядом недостатков и технологических и экономических ограничений.

Так, опираясь на анализ работ по химическим и механическим взаимодействиям элементов композитного материала при плазменном напылении из приведенных карбидов обычно используются: WC и SiC.

Таблица 1.8 – Теплофизические и физико-механические свойства карбидов

Материал	ρ , г/см ³	$t_{пл}$, °C	$t_{кип}$, °C	c , кал/г °C	λ , кал/см с °C	$\alpha \cdot 10^{-6}$ 1/°C	ε (λ , T)	E 10^4 кгс/мм ²
Карбид бора B ₄ C	2,52	2450	> 3500	0,49 (500° C) 0,54 (1000° C)	0,07-0,20 (20-425° C) 0,043 (500° C)	4,73 (24-593° C) 5,81 (24-700° C) 7,11 (24-2400° C)		4,6
Карбид хрома Cr ₃ C ₂	6,70	1890	3800	0,11-0,15 (25° C) 0,19-0,215 (500° C) 0,205-0,27 (1000° C)	0,050 (24° C)	0,86 (20-20° C)		2,8
Карбид титана TiC	4,25	3140	4300	0,11-0,15 (25° C) 0,19-0,22 (500° C) 0,21-0,27 (1000° C)	0,041 (20° C) 0,095 (1000° C) 0,048 (2000° C)	10,64 (24-480° C) 7,4 (25-800° C)	0,96 (1820° C) (λ :0,65 μ)	3,2-4,2 (24° C) 2,8 (820° C)
Карбид циркония ZrC	6,70	3530	5100	0,03-0,08 (25° C) 0,04-0,11 (500° C) 0,05-0,13 (1000° C) 0,07-0,15 (2000° C)	0,083 (25° C)	7,49 (24-1350° C) 6,7 (25-800° C)	0,96 (1820° C) (λ :0,65 μ)	4,1-4,2 (24° C)
Карбид тантала TaC	14,37	3880	5500	0,03-0,08 (25° C) 0,04-0,11 (500° C) 0,05-0,13 (1000° C) 0,07-0,15 (2000° C)	0,053 (20° C) 0,087 (500° C) 0,091 (1000° C) 0,095 (2000° C)	8,2 (25-8000° C) 4,63-5,49 (24-2460° C)	0,67 (1820° C) (λ :0,65 μ)	3,6-3,7
Карбид вольфрама WC	15,77	2867	6000	0,03-0,08 (25° C) 0,04-0,11 (500° C) 0,05-0,13 (1000° C) 0,07-0,15 (2000° C)	0,108 (1000° C) 0,128 (2000° C)	6,2 (25-800° C)		7,22 (20° C) (6,13% C)

Продолжение таблицы 1.8 – Теплофизические и физико-механические свойства карбидов

Материал	ρ , г/см ³	$t_{пл}$, °C	$t_{кип}$, °C	c , кал/г °C	λ , кал/см с °C	$\alpha \cdot 10^{-6}$ 1/°C	ε (λ , T)	$E \cdot 10^4$ кгс/мм ²
Карбид молибдена Mo_2C	9,06-9,18	2687		0,03-0,08 (25° C) 0,04-0,11 (500° C) 0,05-0,13 (1000° C) 0,07-0,15 (2000° C)	0,054-0,087 (1000 C) 0,014-0,079 (2000° C)	7,2 (24-1650° C)		2,3
Карбид кремния SiC	3,2	>2700	-	0,11-0,15 (25° C) 0,19-0,22 (500° C) 0,21-0,27 (1000° C)	0,10 (20°-425° C) 0,207 (500° C) 0,124 (1000° C)	4,3-4,5 (20° C) 4,7 (25-800° C) 4,9 (24-1360° C)		3,9 (25° C) 3,7 (500° C) 3,5 (1000° C)
Карбид гафния HfC	12,67	3720-4050		0,03-0,08 (25° C) 0,04-0,11 (500° C) 0,05-0,13 (1000° C) 0,07-0,15 (2000° C)	0,372 (1000 C) 0,054 (2000° C)	6,48 (24-601° C) 5,17 (24-2200° C)		3,6 (25° C)
Карбид ниобия NbC	5,85	3480-3520	4300	0,03-0,08 (25° C) 0,04-0,11 (500° C) 0,05-0,13 (1000° C)	0,034 (20 C) 0,083 (1000° C) 0,066 (2000° C)	6,3 (24-1930° C)		3,4

В работе [167] подробно описано применение карбида вольфрама (WC) в газотермических процессах нанесения покрытия. При формировании слоя напыления WC обеспечивается высокая износостойкость и твердость.

Тем не менее, применение WC в чистом виде нецелесообразно, поскольку при напылении он распадается на W_2O и C. Как показывает практика [167], применение WC при плазменном напылении возможно совместно с кобальтом и самофлюсующимся сплавом после предварительной обработки, что значительно усложняет процесс подбора процентного содержания элементов материала напыления.

В работах [8, 35] описано применение карбида кремния (SiC) в различных областях промышленности, таких как ракетно-космическое машиностроение, авиастроение и т.д. Также на сегодняшний день SiC активно используется в nanoиндустрии при проектировании электрических составляющих. Карбид кремния весьма устойчив при высоких температурах и жесткой радиации. Кроме того, он весьма экономичен и доступен.

Рассматривая возможность применения SiC в роли наполнителя композитного материала с матрицей Ni-Cr-B-Si-Fe , стоит учитывать, что с повышением в составе матрицы таких компонентов как B и Si приведет к значительному уменьшению сопротивляемости к ударным нагрузкам [132], а, следовательно, и к отслоению материала напыления ввиду активного абразивного и ударного воздействий на рабочие поверхности шнека. К таким же механическим дефектам приведет применение в качестве наполнителя карбида бора (B_4C).

Применение в роли наполнителя карбида хрома (CrC) нецелесообразно из-за относительно низкой температуры плавления относительно всех карбидов – $1890\text{ }^\circ\text{C}$, поскольку температура ядра плазменной дуги при плазменном напылении транспортирующим газом – азотом, составляет порядка $12\ 000\ \text{K}$ [132].

Опираясь на работы [7, 8, 35, 113, 132, 167], а также на физико-механические свойства карбидов металлов (таблица 1.8), наполнителем композитного материала был выбран карбид титана (TiC).

Карбид титана относится к группе синтетических, сверхтвердых, тугоплавких, жаропрочных материалов и достаточно востребован для производства защитных покрытий [125, 159]. Преимущества TiC , которые позволят протекать процессу плазменного напыления без критических отклонений, следующие:

- способность выдерживать резкие температурные перепады;
- высокая прочность;
- особая жаропрочность;
- малая скорость испарения;

стойкость к абразивному износу;

стойкость к агрессивным эксплуатационным средам.

Однако при температурах ниже 673 К механизм разрушения TiC имеет хрупкий характер, а при более высокой температуре наблюдается переход в хрупковязкую область [84].

Использование TiC в качестве наполнителя композитного материала с матрицей Ni-Cr-B-Si-C устранил данный недостаток, поскольку как показывают результаты работы [84] ряд металлов – Ni, Fe, Co смачивают поверхность карбида титана и дают перспективные предпосылки для создания износостойкого материала. Приведенные материалы (Ni, Fe) являются составляющими порошка ПР-НХ17СР4, следовательно, проблема хрупкости TiC при определенных температурных воздействиях будет исключена.

Известны работы [3, 12], в которых TiC уже применялся как наполнитель композитного покрытия. В данных работах авторы производили варьирование процентного содержания TiC для достижения повышенной твердости и износостойкости формируемого покрытия.

Тем не менее, так и не была определена эффективность использования разнопроцентных добавок TiC в составе композитных порошков при эксплуатации различных деталей и механизмов в условиях абразивного изнашивания.

В данной работе по нанесению композитного порошка, наполнителем которого является TiC, с помощью плазменного напыления будет формироваться износостойкое покрытие, в состав которого будут входить основные элементы матрицы порошка ПР-НХ17СР4 и наполнитель – TiC. При этом на нижнем уровне покрытия будет формироваться слой с небольшим количеством синтезированного на месте Cr_7C_3 , что также обеспечит повышение износостойкости композитного покрытия в целом. Поскольку TiC весьма эффективен при теплоотводе и восприятию ударных нагрузок (таблица 1.8), то при транспортировке абразивных смесей шнековым конвейером будет обеспечиваться отвод выделяемого тепла из рабочей зоны, что, несомненно, приведет к понижению степени воздействия на транспортируемый груз.

1.5 Выводы по первой главе. Постановка целей и задач

В итоге проведенного анализа сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что на данный момент перспективной и актуальной технологией по восстановлению рабочих поверхностей деталей машин и специального оборудования АПК, в частности шнеков транспортирующих конвейеров с шагом более 120 мм, является плазменное напыление.

2. Определены основные факторы, влияющие на качество и прочностные свойства износостойких композитных покрытий:

качественная подготовка поверхности для нанесения покрытия;

разработка рационального состава композитного материала для напыления детали специального назначения;

назначение рациональных технологических режимов напыления.

3. Определено, что улучшение свойств композитного материала напыления возможно при воздействии на технологические параметры процесса напыления.

На основании выводов были определены цель и задачи исследования, представленные во введении.

2 Теоретические исследования процесса плазменного напыления композитного материала на рабочие поверхности шнека

В соответствии с целью диссертационной работы, одна из поставленных задач исследования, а именно: получение аналитических зависимостей кинематических режимов плазменного напыления от геометрических особенностей рабочих поверхностей шнека при формировании износостойкого композитного покрытия, решалась путем математического моделирования.

Целью поставленной задачи является получение необходимой теоретической информации для дальнейшего составления схемы проведения эксперимента и определения рациональных технологических режимов плазменного напыления.

2.1 Теоретическое исследование кинематических режимов при плазменном напылении

При плазменном напылении одним из основополагающих факторов, влияющих на качество формируемого покрытия, является точность задания скоростей перемещения инструмента (плазмотрона) относительно обрабатываемой поверхности. Это связано с тем, что время напыления и толщина наносимого покрытия находятся в прямой зависимости от кинематических режимов напыления. Неточность в задании кинематических режимов может привести к возникновению погрешности в формировании равнотолщинного покрытия [153, 161]. Кинематические параметры движения плазмотрона рассчитывается с помощью системы уравнений [9, 132]

$$\begin{aligned}
 v &= \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)^2 + \rho^2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial t}\right)^2}, \\
 z &= \frac{\varphi \beta}{\sqrt{1 + \left(\sin \varphi \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \cos \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right)^2}}, \\
 \rho &= \rho(\varphi, z).
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Здесь v – скорость перемещения плазматрона относительно напыляемой поверхности, м/с; ρ, φ, z – цилиндрические координаты; $\frac{\partial \varphi}{\partial t}$ – скорость вращения обрабатываемой детали, м/с; $\frac{\partial z}{\partial t}$ – продольная скорость перемещения плазматрона, м/с; $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ – радиальная скорость перемещения плазматрона, м/с; β – шаг спирали траектории перемещения центра пятна напыления по поверхности.

По причине сильного износа шнека, в частности вала и транспортирующих витков винта, необходимо определить скорость перемещения плазматрона относительно винтовой v_1 и цилиндрической v_2 поверхностей.

Произведем преобразование первого уравнения системы (2.1)

$$v_1 = \sqrt{\rho^2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)^2}, \quad (2.2)$$

$$v_2 = \sqrt{r^2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)^2}, \quad (2.3)$$

где, r – радиус вала шнека, м.

Уравнения (2.2) и (2.3) учитывают геометрию образующих винтовой и цилиндрической поверхностей шнека.

Траектория центра пятна при плазменном напылении деталей тел вращения представлена на рисунке 2.1 и имеет вид спирали Архимеда.

Выведем уравнение формообразования винтовой поверхности, учитывая технологические и конструкторские аспекты технологии изготовления шнека [36] и его геометрическую схему в виде развертки винтовой линии [19].

Винтовые линии при одинаковом центральном угле разворачиваются в две концентрические дуги, которые относятся друг к другу как радиусы [47].

Тогда

$$\frac{r_1}{R_1} = \frac{c}{C},$$

$$R_1 = r_1 + h_v, \quad (2.4)$$

где r_1 и R_1 – радиусы дуг, м; c – длина витка внутренней винтовой линии, м; C – длина витка внешней винтовой линии, м; h_v – ширина винтовой поверхности, м.

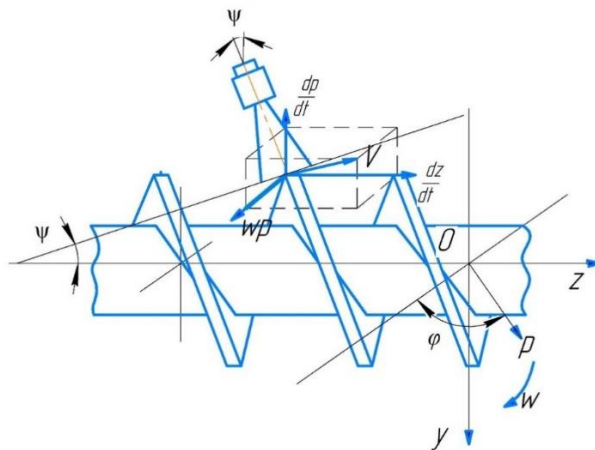


Рисунок 2.1 – Схема напыления детали вращения – шнека

Длины витков внешней и внутренней винтовых линий определяются по формулам

$$C = \sqrt{h_v^2 + (\pi D_1)^2},$$

$$c = \sqrt{h_v^2 + (\pi D_2)^2}, \quad (2.5)$$

где D_1 – диаметр внешней винтовой линии, м; D_2 – диаметр внутренней винтовой линии, м.

Винтовая поверхность шнека имеет угол подъема. Угол подъема винтовой линии вычисляется по формуле [36]

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{h}{\pi d}, \quad (2.6)$$

где φ_1 – угол подъема винтовой линии, град; h – шаг винтовой линии, d – диаметр вала шнека, м.

Для винтовой линии строится развертка витка цилиндрической поверхности (рисунок 2.2), с помощью которой определяется шаг винтовой линии.

Шаг винтовой линии h в формуле (2.6) определяется с помощью построения развертки витка цилиндрической поверхности линии. Изображение развертки представлено на рисунке 2.2.

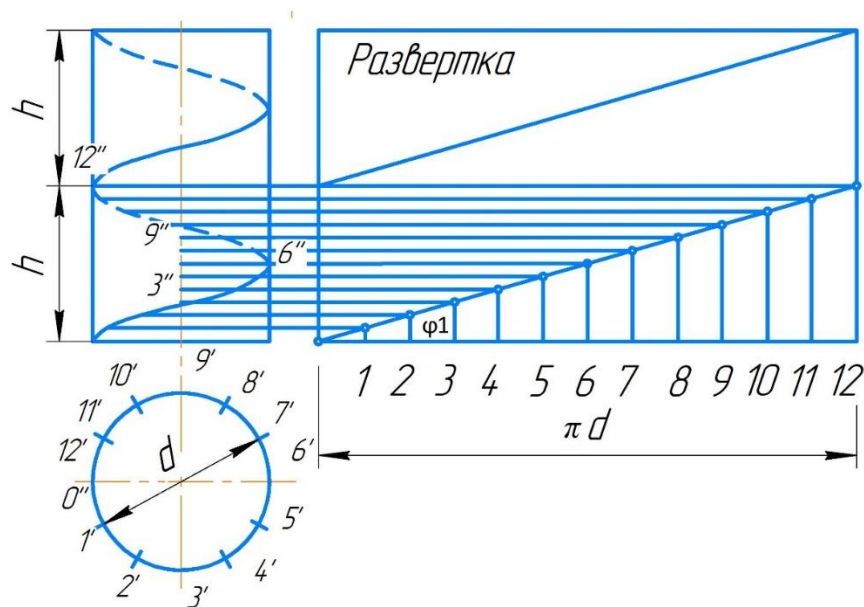


Рисунок 2.2 – Развертка витка цилиндрической поверхности линии

В уравнении формообразования винтовой поверхности шнека должен быть учтен угол выреза [58, 83], который определяется отношением разностей длин витков внешней S и внутренней винтовых линий s к разности радиусов дуг

$$\alpha = \frac{S - s}{R_1 - r_1}. \quad (2.7)$$

Используя уравнения с 2.4 по 2.7, получаем

$$\rho(\varphi, z) = \frac{\sqrt{\pi^2 \left((dtg \varphi_1)^2 + D_1^2 \right)} - \sqrt{\pi^2 \left((dtg \varphi_1)^2 + D_2^2 \right)}}{\alpha}. \quad (2.8)$$

Уравнение по определению скорости перемещения плазмотрона относительно винтовой поверхности шнека (2.2) с учетом формулы (2.8)

$$v_1 = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{\pi^2 \left((dtg \varphi_1)^2 + D_1^2 \right)} - \sqrt{\pi^2 \left((dtg \varphi_1)^2 + D_2^2 \right)}}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)^2}. \quad (2.9)$$

Выразим $\frac{\partial \varphi}{\partial t}$ через $\frac{\partial z}{\partial t}$ [132]

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial \varphi}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\partial z}{\partial t}. \quad (2.10)$$

Учитывая преобразование (2.10) и математическое описание вращения кругового цилиндра [19], определим скорость вращения шнека при напылении его винтовой поверхности и продольную скорость перемещения плазмотрона [56, 60]

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{v}{\sqrt{\left(\sqrt{\pi^2 \left((dtg \varphi_1)^2 + D_1^2 \right)} - \sqrt{\pi^2 \left((dtg \varphi_1)^2 + D_2^2 \right)} \right)^2 / \alpha^2 + \beta^2}}, \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\beta v}{\sqrt{\left(\sqrt{\pi^2 \left((dtg \varphi_1)^2 + D_1^2 \right)} - \sqrt{\pi^2 \left((dtg \varphi_1)^2 + D_2^2 \right)} \right)^2 / \alpha^2 + \beta^2}}. \quad (2.12)$$

Учитывая преобразование (2.10), определим скорость вращения шнека при напылении его цилиндрической поверхности вала и продольную скорость перемещения плазмотрона [132]

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\beta v}{\sqrt{r^2 + \beta^2}}, \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{v}{\sqrt{r^2 + \beta^2}}. \quad (2.14)$$

Учитывая геометрию рабочих поверхностей шнека, были получены уравнения формообразования обрабатываемых винтовой поверхности детали [56]. Взяв за основу уравнения, описывающие кинематику процесса газотермической обработки детали, были получены уравнения для расчета кинематических режимов напыления винтовой и цилиндрической поверхностей шнека, в частности:

уравнения по определению скоростей перемещения плазматрона относительно напыляемых поверхностей;

уравнения скорости вращения шнека при осаждении покрытия на поверхности детали.

Определим разность Δ между скоростью перемещения плазматрона, которая назначается технологом-оператором, как правило, без учета геометрии поверхностей детали, и скоростью перемещения плазматрона, учитывающую геометрические параметры напыляемой поверхности (Δ_1 – для винтовой поверхности; Δ_2 – для цилиндрической поверхности)

$$\Delta_1 = |v_n - v_1| = \left| v_n - \sqrt{\left(\frac{\sqrt{\pi^2 ((dtg \varphi_1)^2 + D_1^2)} - \sqrt{\pi^2 ((dtg \varphi_1)^2 + D_2^2)}}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)^2} \right|, \quad (2.15)$$

$$\Delta_2 = |v_n - v_2| = \left| v_n - \sqrt{r^2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)^2} \right|, \quad (2.16)$$

где v_n – скорость перемещения плазматрона без учета геометрических параметров поверхности детали, м/с.

На основе полученных математических уравнений разработаны

программные продукты, позволяющие моделировать процесс плазменного напыления деталей с различной геометрией её рабочих поверхностей, а также прогнозировать и назначать рациональные кинематические режимы напыления [136].

2.2 Теоретическое исследование процесса формирования равнотолщинного покрытия при плазменном напылении

Одной из актуальных задач в области нанесения композитных материалов на восстанавливаемые поверхности детали является прогнозирование толщины формируемого покрытия с последующим управлением процесса напыления. При назначении технологических параметров, которые обеспечат требуемую толщину формируемого покрытия, используется в основном эмпирический подход повышенной трудоемкости. Этот подход предполагает увеличение величины припуска, что приводит к потерям композитного материала, повышению величины растягивающих остаточных напряжений на поверхности нанесенного покрытия, и, кроме того, к повышению количества операций последующей механической обработки.

Формирование равнотолщинного напыляемого слоя на винтовой и цилиндрической поверхностях шнека возможно при условии точного задания кинематических режимов плазменного напыления [66], в частности скорости перемещения плазматрона вдоль траектории обрабатываемых поверхностей.

Решение задачи по прогнозированию толщины формируемых покрытий на рабочих поверхностях шнека и управлению этим процессом можно реализовать посредством назначения рациональных кинематических режимов процесса плазменного напыления.

Стоит отметить, что для решения поставленной задачи были приняты следующие допущения: частицы композитного материала должны иметь одинаковый диаметр; диаметр напыляемых частиц должен быть меньше

диаметра плазменной струи; поток частиц должен быть практически перпендикулярен поверхности напыления.

Как показывает практика [23, 24, 100, 132, 141], плазменное напыление покрытий производится с постоянной производительностью плазматрона, движущегося с заданной скоростью.

Толщина нанесенного покрытия, с учетом принятых допущений, может быть найдена по следующей формуле [34]

$$H = H_{\max} \times \exp\left(-\frac{x^2}{b^2}\right), \quad (2.17)$$

где H_{\max} – максимальная толщина нанесенного покрытия, мкм; x – координата движения сопла плазматрона относительно плоскости напыления детали, мкм; b – радиус пятна распыления, мкм.

В результате перемещения плазматрона относительно винтовой и цилиндрической поверхностей шнека напыляемый материал осаждается в виде полуваликов. Для получения покрытий на поверхностях такой крупногабаритной детали как шнек, напыление должно производиться в три ряда и более (рисунок 2.3) [34, 77]. При этом смещение оси плазменного потока устанавливается так, чтобы при напылении произошло взаимное наложение и частичное перекрытие соседних полуваликов.

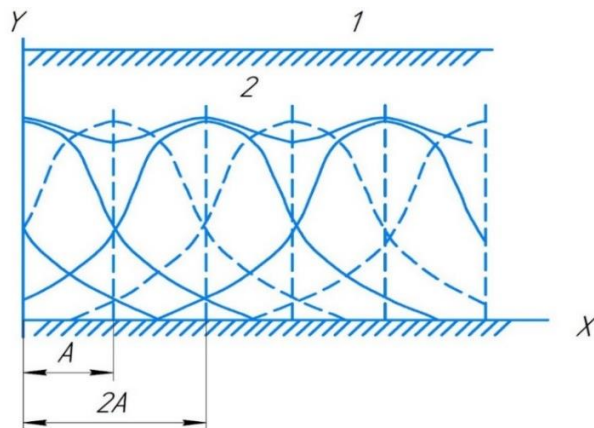


Рисунок 2.3 – Схема образования многорядного покрытия

Для трех и более рядов напыления (рисунок 2.3), толщина нанесенного слоя может быть рассчитана [34, 100]

$$H = \frac{\delta \times \sqrt{\pi b}}{\nu} \times \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{b^2}\right) + \exp\left[-\frac{1}{b^2}(x-A)^2\right] + \exp\left[-\frac{(x+A)^2}{b^2}\right] \right\}, \quad (2.18)$$

где δ – коэффициент, характеризующий скорость увеличения толщины покрытия в центре пятна распыла; A – расстояние между рядами (шаг смещения), мкм.

Взяв за основу уравнение (2.18) и учитывая уравнения скорости вращения шнека при напылении его винтовой и цилиндрической поверхностей, продольные скорости перемещения плазмотрона (2.11) и (2.12), а также уравнения скорости перемещения плазмотрона относительно напыляемых винтовой (2.9) и цилиндрической (2.3) поверхностей шнека, получаем уравнения для расчета толщины покрытия на рабочих поверхностях шнека [10, 163]

$$H_1 = \frac{\delta \times \sqrt{\pi b}}{\sqrt{\left(\frac{\sqrt{\pi^2 \left((dtg \varphi_1)^2 + D_1^2 \right) - \sqrt{\pi^2 \left((dtg \varphi_1)^2 + D_2^2 \right)}}}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)^2}} \times \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{b^2}\right) + \exp\left[-\frac{1}{b^2}(x-A)^2\right] + \exp\left[-\frac{(x+A)^2}{b^2}\right] \right\}, \quad (2.19)$$

$$H_2 = \frac{\delta \times \sqrt{\pi b}}{\sqrt{r^2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)^2}} \times \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{b^2}\right) + \exp\left[-\frac{1}{b^2}(x-A)^2\right] + \exp\left[-\frac{(x+A)^2}{b^2}\right] \right\},$$

где H_1 – толщина нанесенного слоя на винтовой поверхности шнека, мкм; H_2 – толщина нанесенного слоя на цилиндрической поверхности шнека, мкм.

В итоге, опираясь на практические и теоретические данные по формированию равнотолщинного слоя напыления и на уравнения, описывающие кинематику плазменного напыления винтовой и цилиндрической поверхно-

стей шнека, были получены аналитические зависимости, позволяющие спрогнозировать толщину покрытия плазменного напыления рабочих поверхностей шнека при его восстановлении.

Разработан программный продукт, в основе которого заложены полученные уравнения, позволяющие определять толщину покрытия при плазменном напылении рабочих поверхностей детали [137].

2.3 Теоретическое исследование теплофизических особенностей процесса плазменного напыления композитного материала

Известно [151], что одной из основных характеристик, описывающих технологию плазменного напыления, является температура нагрева детали, подвергаемой обработке в разных точках зоны термического воздействия.

Как было определено ранее, в качестве исследуемых поверхностей детали при процессе распределения тепла выступают винтовая и цилиндрическая поверхности шнека транспортирующего конвейера.

Винтовая поверхность представляет собой набор эвольвентных геликоидов, пример которых изображен на рисунке 2.4.

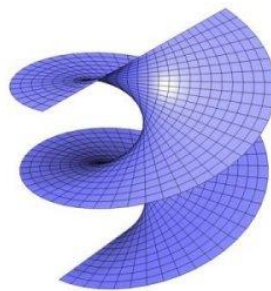


Рисунок 2.4 – Схематичное изображение винтовой поверхности

Цилиндрическая поверхность (рисунок 2.5), образована прямыми, проходящими через все точки окружности, перпендикулярными плоскости, в которой лежит эта окружность.



Рисунок 2.5 – Схематичное изображение цилиндрической поверхности

Для анализа тепловых потоков, приходящих на винтовую и цилиндрическую поверхности шнека, воспользуемся моделью лучистого и конвективного теплообмена, которая основана на теории пограничного слоя [102, 116]. Для разработки уравнения по определению температуры нагрева рабочих поверхностей шнека при плазменном напылении, составлена расчетная схема процесса плазменного оплавления композитного материала «покрытие-основа» (рисунок 2.6).

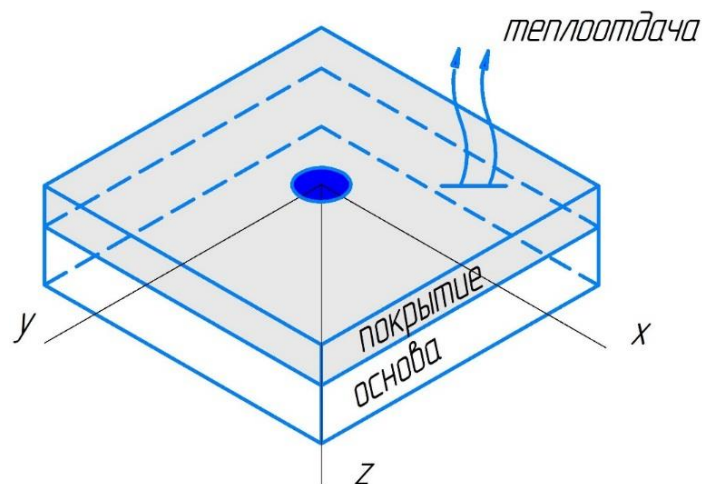


Рисунок 2.6 – Расчетная схема «покрытие-основа»

Опираясь на результаты работ [23, 32], запишем систему уравнений, которая в обобщенной форме описывает процесс нагрева плазменной дугой поверхности материала детали

$$\begin{aligned} q_K &= a(T_{\text{плаз}} - T_{\text{нов}}), \\ q_L &= \xi_1 \xi_2 \times \sigma_c T_{\Pi}^4, \end{aligned} \quad (2.20)$$

где q_K – конвективный теплообмен, Дж; a – коэффициент температуропроводности материала детали (шнека); $T_{\text{плаз}}$ – температура плазменной дуги на внешней границе пограничного слоя, К; $T_{\text{нов}}$ – температура поверхности, К; ξ_1 – интегральная поглощательная способность поверхности; ξ_2 – степень черноты плазмы; σ_c – постоянная Стефана-Больцмана; T_{Π} – температура плазмы, К.

Уравнение процесса распространения тепла в обрабатываемой детали от движущейся плазменной струи в общем виде имеет вид [104, 152]

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi\lambda_0 v} \times \frac{\exp\left(\frac{z_1}{4at}\right)}{\sqrt{t(t_0 - t)}}, \quad (2.21)$$

где T – температура нагрева детали (шнека), (К); z_1 – глубина пятна нагрева, мкм; t – время нагрева, сек; t_0 – длительность распространения фиктивного источника, сек; T_0 – начальная температура материала детали (шнека), К; Q – эффективная мощность плазменной дуги, Вт; λ_0 – коэффициент теплопроводности материала, Вт/мК.

В работе [78] для определения коэффициента теплопроводности с учетом пористости покрытия применяется уравнение

$$\lambda_0 = \lambda_M (1 - P) \lambda_B P, \quad (2.22)$$

где λ_M – коэффициент теплопроводности материала покрытия, Вт/мК; λ_B – коэффициент теплопроводности газа, Вт/мК; P – пористость покрытия, %.

Для плазменного напыления, когда тепловой поток перпендикулярен формируемому слою покрытия, используется уравнение Лихтенекера [16, 32]

$$\lambda_0 = \lambda_M^{1-P} \lambda_B^P. \quad (2.23)$$

В случае напыления дисперсно-наполненного композитного материала необходимо учитывать, как теплопроводность матрицы, так и наполнителя.

Поэтому в ходе исследования использовались следующие уравнения по определению теплопроводности двухфазных композитных материалов:

формула Оделевского [50]

$$\lambda_{M1} = \lambda_{кв} \left(1 - \frac{v_{нап}}{\frac{1}{1 - \lambda_{нап} / \lambda_{кв}} - \frac{1 - v_{нап}}{3}} \right), \quad (2.24)$$

формула Миснара [119]

$$\lambda_{M2} = \lambda_{кв} \left(1 + v_{нап} \frac{1 - \lambda_{кв} / \lambda_{нап}}{1 - v_{нап} (1 - \lambda_{кв} / \lambda_{нап})} \right), \quad (2.25)$$

где $\lambda_{нап}$ и $\lambda_{кв}$ – коэффициенты теплопроводности матричного материала и наполнителя; $v_{нап}$ – объемная доля наполнителя.

Значения, полученные в результате расчетов по формулам 2.24 и 2.25, могут несколько различаться, что может привести к некорректным выводам по определению теплопроводности двухфазного композитного материала.

Для корректировки результатов расчета был разработан метод конструирования формулы теплопроводности материала путем инверсии наполнителя и матрицы композитного материала [85]

$$\begin{aligned} \lambda'_{M1} &= a_1 \lambda''_{M1} + a_2 \lambda_{M1}, \\ \lambda'_{M2} &= a_1 \lambda''_{M2} + a_2 \lambda_{M2}, \end{aligned} \quad (2.26)$$

где λ''_{M_1} – теплопроводность материала «матричный материал-наполнитель»; a_1 и a_2 – эмпирические коэффициенты, подбираемые по правилу нормировки $a_1 + a_2 = 1$; $a_1 \leq a_2$.

Учитывая формулы Оделевского и Миснара 2.24 и 2.25, а также метод конструирования формулы теплопроводности 2.26, итоговое уравнение по определению коэффициента теплопроводности двухфазного композитного материала примет вид

$$\lambda_0 = \left(\frac{\lambda'_{M_1} + \lambda'_{M_2}}{2} \right)^{1-P} \lambda_B^P. \quad (2.27)$$

Для определения эффективной мощности плазменной дуги воспользуемся известными математическими зависимостями.

Эффективная мощность плазменной дуги определяется [141]

$$Q = 0,24\eta_u UI, \quad (2.28)$$

где η_u – эффективный КПД процесса нагрева; U – падение напряжения на дуге, В; I – сила тока, А.

Время распространения фиктивного источника определяется [124]

$$t_0 = 1/4ak, \quad (2.29)$$

где k – коэффициент сосредоточенности плазменного источника нагрева.

Ввиду скоротечности процесса время нагрева условно можно считать за время протекания нанесения плазменного покрытия на обрабатываемые поверхности шнека, поэтому приравняем время движения частиц в плазменной струе и время нагрева поверхности детали $t = \tau$.

Время движения частиц в плазменной струе равно [139]

$$\tau = \frac{2x_0}{W_p}, \quad (2.30)$$

где x_0 – расстояние от среза сопла, м; W_p – скорость порошка в плазменной струе, м/с.

Для определения скорости порошка в плазменной струе воспользуемся выражением [77, 78, 100]

$$W_p = W \sqrt{\frac{3\rho_p C_x}{2\rho_v d_p}} x_0, \quad (2.31)$$

где ρ_v – плотность газа при соответствующей температуре, кг/м³; ρ_p – усредненная плотность композитного материала, кг/м³; d_p – средний размер фракций композитного материала, м; C_x – коэффициент сопротивления.

Экспериментально установлено [32, 50, 119, 124, 152], что для частиц с неправильной округлой формой (без резких выступов) коэффициент сопротивления на стадии установившегося обтекания дозвуковым потоком определяется числом Рейнольдса.

В ходе проводимого исследования была установлена зависимость числа Рейнольдса и коэффициента сопротивления [28, 32, 100, 104]:

- 1) $Re \leq 1$, то $C_x = \frac{24}{Re}$;
- 2) $Re = 1 \dots 1.99$, то $C_x = \frac{24}{Re} \left(1 - \frac{3}{16} Re\right)$;
- 3) $Re = 2 \dots 30$, то $C_x = \frac{24,4}{Re^{0,793}}$;
- 4) $Re = 31 \dots 500$, то $C_x = \left(\frac{24}{Re}\right) + \frac{4}{Re^{0,33}}$;
- 5) $Re = 501 \dots + \infty$, то $C_x = \left(\frac{24}{Re}\right) + \frac{24,4}{Re^{0,793}}$.

Значительная часть теплоты дуги расходуется на теплоотдачу в окружающую среду, расплавление порошка в струе, разбрызгивание и т.п.

Также, стоит учесть, что при обработке винтовой поверхности шнека происходит отражение тепловых волн в виду сложного профиля поверхности и наличия кромок. Вследствие данной особенности для более точного определения температуры нагрева рабочих поверхностей шнека введем коэффициент изменения температуры нагрева поверхности детали, учитывающий отражение тепловых волн – k_i .

В итоге, уравнения, описывающие кинематику плазменного напыления винтовой и цилиндрической поверхностей шнека (2.3, 2.9, 2.11, 2.12), а также проведенные исследования в области теплофизических особенностей процесса плазменной обработки детали, дают возможность получить уравнения температуры нагрева винтовой (T_1) и цилиндрической (T_2) поверхностей шнека [11]

$$\begin{aligned}
 T_1 = k_i & \left(\frac{0,12\eta_u UI}{\pi \times \left(\frac{\lambda'_{M1} + \lambda'_{M2}}{2} \right)^{1-P} \times \lambda_B^P \times \sqrt{\left(\frac{\sqrt{\pi^2 \left((dtg\varphi_1)^2 + D_1^2 \right) - \sqrt{\pi^2 \left((dtg\varphi_1)^2 + D_2^2 \right)}}}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\partial\varphi}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)^2}} \right) \times \\
 & \left(\frac{\exp\left(\frac{z_1^2 c \rho_c}{4\lambda_0 \tau} \right)}{\sqrt{(\tau(1/4ak + \tau) \pm const)}} + T_0 \right) \times \\
 & \times \frac{2\alpha_0}{c_0 \rho_v L} + T_0, \\
 T_2 = k_i & \left(\frac{0,12\eta_u UI}{\pi \times \left(\frac{\lambda'_{M1} + \lambda'_{M2}}{2} \right)^{1-P} \times \lambda_B^P \times \sqrt{r^2 \left(\frac{\partial\varphi}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)^2}} \right) \times \\
 & \left(\frac{\exp\left(\frac{z_1^2 c \rho_c}{4\lambda_0 \tau} \right)}{\sqrt{(\tau(1/4ak + \tau) \pm const)}} + T_0 \right) \times \frac{2\alpha_0}{c_0 \rho_v L} + T_0,
 \end{aligned} \tag{2.32}$$

где L – толщина стенок винтовой поверхности шнека, м; c_0 – теплопроводность транспортирующего газа, Вт/мК; c – теплопроводность покрытия, Вт/мК; ρ_c – плотность покрытия, кг/м³; α_0 – коэффициент теплоотдачи (в общем случае он отражает совместное действие конвекции (α_k) и излучения (α_p), то есть $\alpha = \alpha_k + \alpha_p$) [152].

2.4 Оценка контактной температуры при соединении композитного материала покрытия с рабочими поверхностями шнека

Низкая прочность сцепления покрытия с основой и теплопроводность композитного покрытия к поверхности детали связаны со сложностью и неоднородностью теплофизических процессов, протекающих при контакте частиц материала напыления с подложкой [106, 140]. Наиболее значимым из них является процесс нагрева поверхности детали, поскольку в случае высокого показателя теплоотдачи плазменной струи в деталь – возникает коробление геометрии детали. При этом одним из главных параметров, определяющих скорость протекания процесса сцепления покрытия и поверхности детали, является контактная температура.

Из опыта известно [24, 78, 100, 132], что для обеспечения высокой прочности сцепления покрытия с основой следует создавать необходимую шероховатость на подложке. Однако, при теоретических расчетах контактной температуры, наличие шероховатости подложки не учитывается. Поэтому необходима проработка аналитических зависимостей, описывающих влияния шероховатости поверхности детали на величину контактной температуры.

Будем считать, что средний диаметр частицы двухфазного композитного материала напыления больше среднего расстояния между ближайшими микровыступами. При этом жидкая частица покрытия будет охватывать микровыступ на поверхности детали с двух сторон и его нагрев будет более интенсивным.

Зададим форму поперечной шероховатости в виде треугольников с прямым углом на вершинах и впадинах (рисунок 2.7). Для определения температурного поля микровыступа обозначим тепловые потоки вдоль координатных осей OX и OY через q_x и q_y [114, 115]. Рассмотрим нагрев микровыступа под воздействием теплового потока q_x .

Воспользуемся уравнением нестационарной теплопроводности [131]

$$\frac{\partial T_M}{\partial \tau_1} = a \frac{\partial T_M^2}{\partial x_1}, \quad (2.33)$$

где T_M – температура микровыступа, зависящая от времени нагрева τ_1 и координаты x_1 , К.

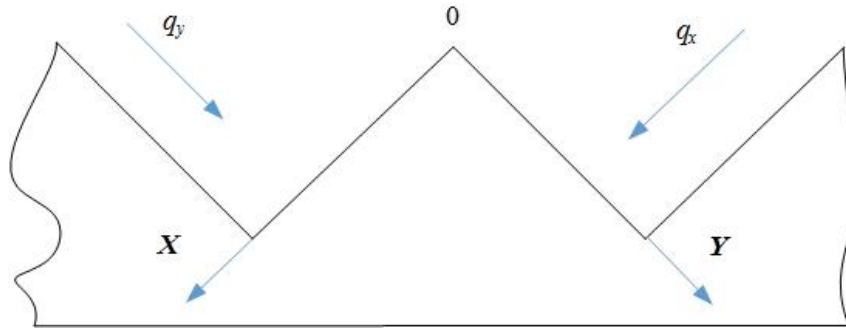


Рисунок 2.7 – Расчетная схема температурного поля микровыступа на подложке

Начальные и граничные условия для частиц покрытия с начальной температурой T_H и для микровыступа с начальной температурой T_0 будут следующими

$$\begin{aligned} \tau_1 = 0: T_0 = const \\ \tau_1 \triangleright 0: x_1 = 0: T_M = T_K, \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$x_1 \Rightarrow \infty: \frac{\partial T_M}{\partial x_1} = 0 \quad T_M = T_0, \quad (2.35)$$

где T_K – температура при контакте микровыступа и частицы двухфазного композитного покрытия, К.

Тогда, решение уравнения (2.33) можно представить в виде

$$T_M - T_0 = \theta(T_K - T_0), \quad (2.36)$$

где θ – параметр температуры, который выражается через интеграл ошибок

$$\theta = 1 - \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{F_0}}, \quad (2.37)$$

где F_0 – критерий Фурье.

Плотность теплового потока на поверхности микровыступа в зоне контакта равна [78, 132]

$$q_{xM} = -\lambda_1 \frac{\partial T_M}{\partial x_1} = -\frac{\lambda_1 (T_K - T_0)}{\sqrt{\pi a \tau_1}}, \quad (2.38)$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности материала шнека.

Аналогично плотность теплового потока в частице покрытия определяется

$$q_{xP} = -\lambda_0 \frac{\partial T_M}{\partial x_1} = -\frac{\lambda_0 (T_H - T_K)}{\sqrt{\pi a_0 \tau_1}}, \quad (2.39)$$

где a_0 – коэффициент температуропроводности двухфазного композитного материала напыления.

На поверхности микровыступа, при $x=0$, температура нагрева под действием теплового потока q_x , будет равна контактной температуре, величина которой определится при равенстве формул (2.38) и (2.39), поскольку плотность теплового потока в зоне контакта не изменяется при переходе от покрытия к подложке [114, 115]

$$T_K = \frac{T_H + T_0 \sqrt{Q_2 c_1 C_2 / Q_1 c C_1}}{1 + \sqrt{Q_2 c_1 C_2 / Q_1 c C_1}}, \quad (2.40)$$

где Q_1 и Q_2 – плотности покрытия и материала шнека, кг/м³; C_1 и C_2 – теплоемкости покрытия и материала шнека, Дж/К; c и c_1 – теплопроводность покрытия и материала шнека, Вт/мК.

Рассмотрим изменение температурного поля в зоне контакта частиц материала напыления с шероховатостью поверхности шнека.

Уравнение (2.40) определяет контактную температуру в начальный момент контакта, следовательно, через некоторое время линия, определяющая положение контактной температуры станет параллельной траектории вершин микровыступов или плоскости поверхности шнека. Из закона симметрии [76] следует, что линия, определяющая положение контактной температуры, должна быть расположена посередине высоты микровыступов (рисунок 2.8).

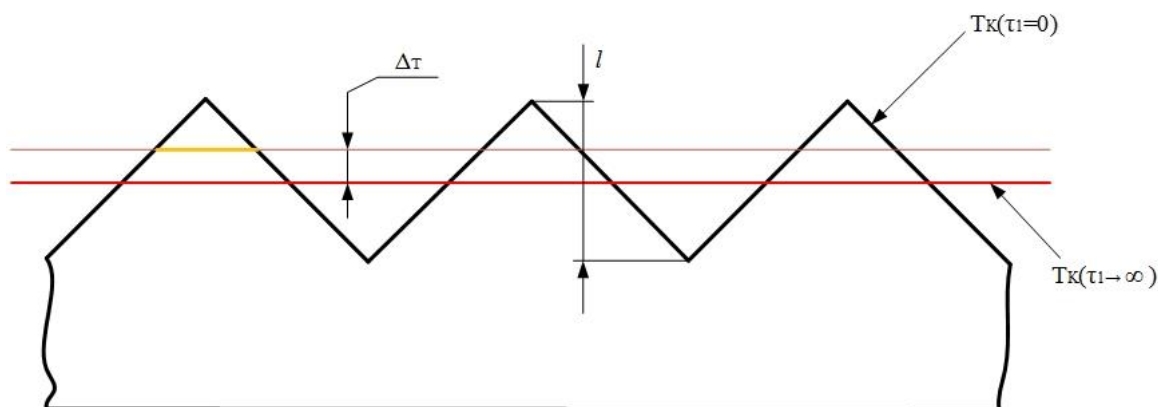


Рисунок 2.8 – Перемещение положения линии контактной температуры во времени

Определим температуру на изотерме контакта под вершиной микровыступа, используя принцип суперпозиции температурных полей, создаваемых правой и левой гранями. Расстояние x_l до грани в средней точке составляет $x_l = l/4\sqrt{2}$, где l – высота микровыступа, (м). Если температура в заданной точке под тепловым воздействием лишь потока q_x достигнет половины температуры T_K , то условие линейности будет выполнено.

На поверхностях микровыступов, расположенных выше медианной линии (рисунок 2.8), которая соответствует $T_K(\tau \rightarrow \infty)$, температура будет больше чем T_K . Определим величину смещения изотермы плавления относительно изотермы контакта

$$\Delta_T = \frac{(T_N - T_K)}{(T_K - T)} \sqrt{\pi a \tau_1}, \quad (2.41)$$

где T_N – температура плавления материала шнека, К.

В итоге проведенных исследований процессов контакта композитного материала с рабочими поверхностями шнека были получены уравнения по определению температуры контакта покрытия и подложки, а также величины смещения изотермы плавления относительно изотермы контакта.

2.5 Выводы по второй главе

Результаты теоретических исследований показали, что от при назначении технологических режимов напыления, в частности скорости перемещения плазмотрона и скорости вращения детали, необходимо учитывать геометрические особенности обрабатываемых поверхностей, поскольку кинематические режимы связаны с процессом формирования толщины покрытия и нагревом обрабатываемых поверхностей.

В ходе исследований были получены:

1. Аналитические зависимости кинематики плазменного напыления от геометрических особенностей рабочих поверхностей шнека.
2. Аналитические зависимости толщины покрытия и температуры нагрева поверхностей шнека от кинематических режимов напыления.
3. Аналитические зависимости по определению величины смещения изотермы плавления относительно изотермы контакта.

Полученные в ходе исследований уравнения были использованы для разработки программных продуктов [136, 137, 138], позволяющих моделировать процесс плазменного напыления деталей с различной геометрией ее рабочих поверхностей и назначать технологические режимы плазменного напыления, что в дальнейшем было использовано при выборе диапазона изменения факторов в ходе проведения экспериментальных исследований.

3 Методика экспериментальных исследований

В соответствии с целью диссертационной работы, поставленные задачи решались экспериментальным методом исследования. Вследствие чего был разработан план, состоящий из четырех этапов:

1 этап. Разработка схемы проведения эксперимента и подбор экспериментального оборудования с используемыми материалами.

2 этап. Проведение экспериментальных исследований. Нанесение композитного материала плазменным напылением с целью восстановления винтовой и цилиндрической поверхностей шнека.

3 этап. Исследование физико-механических характеристик полученного покрытия. Подбор технологических режимов напыления и процентного соотношения элементов дисперсно-наполненного композитного материала с целью подтверждения повышенных эксплуатационных свойств сформированного износостойкого покрытия на рабочих поверхностях шнека.

4 этап. Рассмотрение вопросов применения технологии плазменного напыления композитных материалов на рабочие поверхности деталей машин с технико-экономическим обоснованием [75].

3.1 Экспериментальное оборудование и методика проведения опытов

При проведении исследований по нанесению композитного материала на рабочие поверхности крупногабаритного шнека конвейера агропромышленного комплекса использовалась универсальная установка плазменного напыления УПУ-3Д.

Установка плазменного напыления УПУ-3Д, принципиальная схема которой представлена рисунке 3.1, состоит из основных частей любого комплекса для газотермической обработки деталей [29].

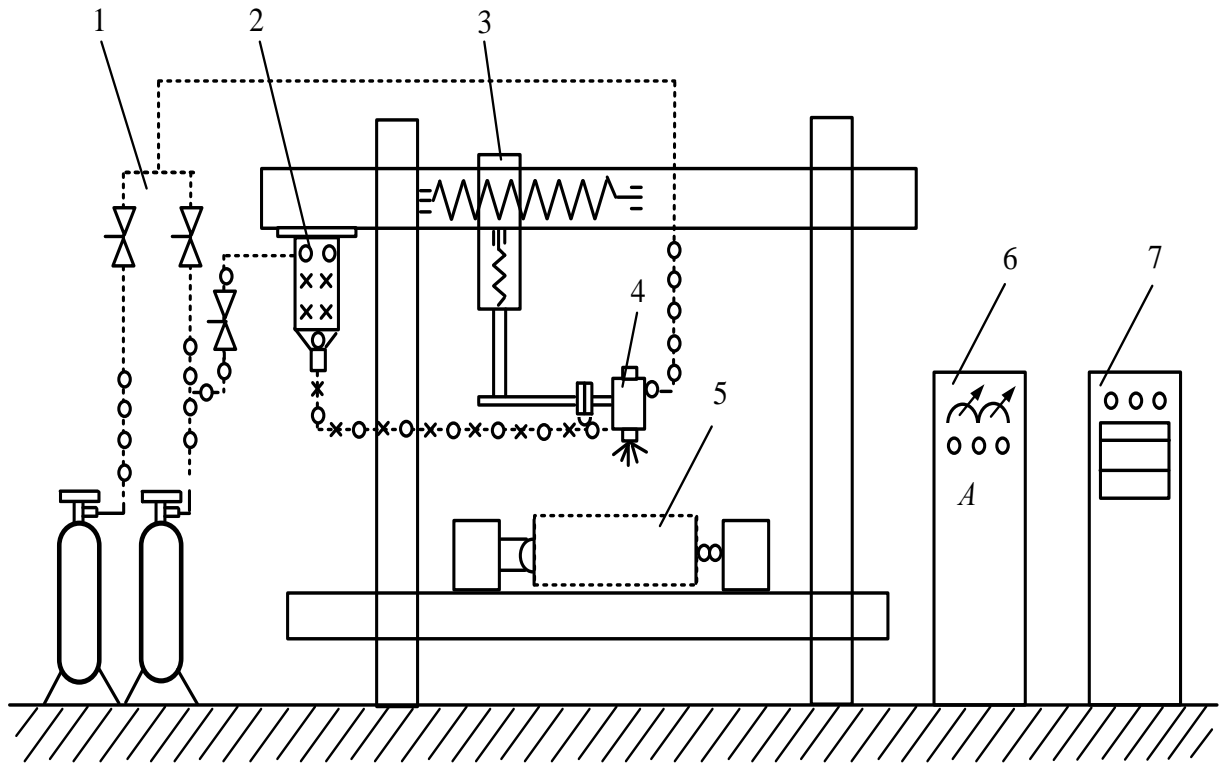


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема установки плазменного напыления УПУ-3Д:

- 1 – система газопитания; 2 – механизм подачи;
 3 – механизм перемещения распылителя; 4 – плазмотрон ПП-50;
 5 – деталь напыления (шнек) и механизм её вращения; 6 – шкаф управления;
 7 – источник питания

Технические характеристики установки плазменного напыления УПУ-3Д представлены в таблице 3.1 [29]. В качестве плазмообразующих газов при нанесении покрытий на установке УПУ-3Д применяют аргон [131].

Основываясь на научных работах таких производственных фирм, как «Плазма-Мастер» и «Плазмацентр» для установки УПУ-3Д был подобран плазмотрон ПНК-50 с межэлектродной вставкой.

Межэлектродная вставка не только фиксирует длину дугового разряда в канале плазмотрона ПНК-50, но и позволяет менять длину дуги, а соответственно, и рабочее напряжение за счет варьирования количества секций.

Это очень удобный инструмент для обработки сложных криволинейных поверхностей крупногабаритных деталей, таких как шнек конвейера.

Таблица 3.1 – Технические характеристики УПУ-3Д

Наименование параметра	Значение
Габаритные размеры комплекса Д×Ш×В, мм	2500×1500×1700
Вес комплекса, кг	не более 1200
Толщина напыляемых покрытий, мм	0,05-5,0
Прочность сцепления напыленного покрытия с подложкой для металлических покрытий, МПа	до 100
Фракция напыляемых порошковых материалов, мкм	40-160
Напыляемые материалы	металлы, керамика
Регулирование тока дуги плазмотрона	плавное
Пределы регулирования тока плазмотрона, А	200-400
Пределы регулирования напряжения плазмотрона, В	30-70
Номинальная мощность плазмотрона, кВт	25
Максимально потребляемая мощность комплекса, кВт	40
Напряжение питания комплекса, В	380×3+1×0
Плазмообразующие газы и смеси	аргон аргон + водород
Расход плазмообразующих газов, м ³ /час	0,9-1,5
Система охлаждения водой по замкнутому контуру	автономная
Расход охлаждающей воды, л/мин	6-10
Давление воды в системе охлаждения, кгс/см ²	3,0-4,5
Производительность напыления, кг/час: керамика (окислы металлов) металлы	2 4

В ходе проведения опытов по напылению винтовых и цилиндрических поверхностей шнека на базе УПУ-3Д была разработана модернизированная установка для нанесения композитных материалов на поверхности деталей различной конфигурации, на которую был получен патент на изобретение № 2762082 от 15.12.2021 г. [130].

Установка (рисунок 3.2) обеспечивает повышение точности перемещения плазмотрона относительно обрабатываемой детали, в частности при напылении винтовой поверхности шнека, за счет того, что плазмотрон установлен с возможностью вращения в двух перпендикулярных проекциях двух координатных плоскостей по заданной программе.

Тем самым достигается повышение прочности сцепления покрытия с основой [164].

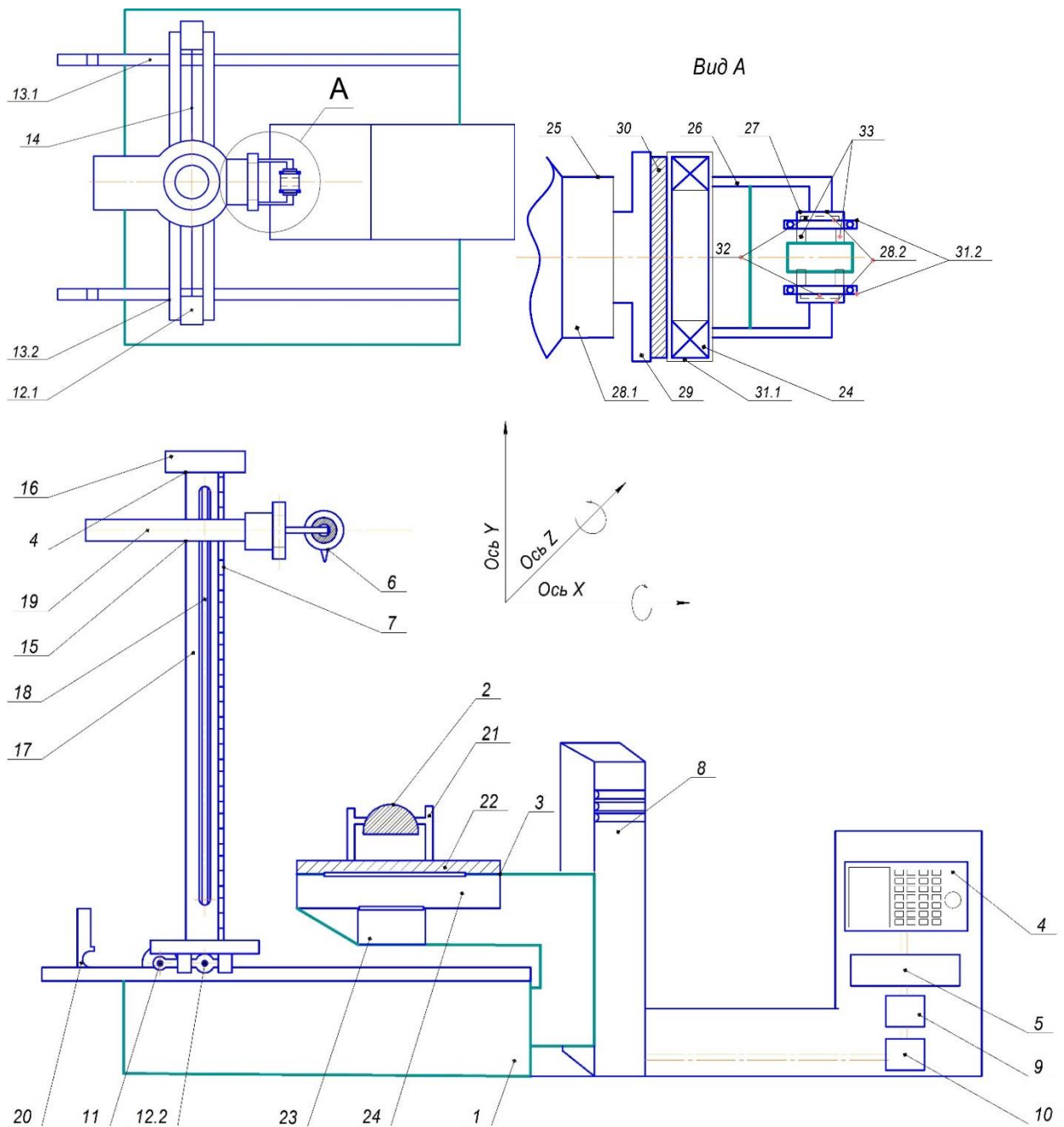


Рисунок 3.2 – Установка для нанесения композитных материалов на поверхности деталей плазменным напылением

На рисунке 3.2 обозначены:

1 – станина, 2 – обрабатываемая деталь, 3 – механизм поворота, 4 – блок ввода данных, 5 – система ЧПУ, 6 – плазмотрон, 7 – измерительная линейка, 8.1 – блок регистрации поверхности детали, 8.2 – блок анализа поверхности детали, 9 – блок корреляции данных, 10 – блок управления механизмами, 11 – механизм продольного возвратно-поступательного движения, 12.1 и

12.2 – линейные электродвигатели, 13.1 и 13.2 – салазки, 14 – механизм поперечного возвратно-поступательного движения, 15 – механизм вертикального перемещения, 16 – электропривод, 17 – корпус, 18 – шарико-винтовая передача, 19 – шток, 20 – ограничители, 21 – кантователь, 22 – платформа, 23 – электродвигатель с тормозом, 24 – вертикальный планетарный редуктор, 25 – механизм продольного вращения, 26 – Г-образные штоки, 27 – механизм поперечного вращения, 28.1 и 28.2 – шаговые электродвигатели, 29 – зубчатый шкив, 30 – ременная передача, 31.1 и 31.2 – подшипники, 32 – волновая передача, 33 – элементы крепления плазмотрона.

При разработке композитного материала покрытия и определения рациональных технологических режимов плазменной обработки, исследования проводились на образцах, изготовленных из стали 20Х (ГОСТ 4543-71), которая относится к конструкционным легированным сталям.

Химический состав стали 20Х представлен в таблице 3.2 [123].

Таблица 3.2 – Химический состав Ст20Х

Массовая доля элемента, %	
Углерод (C)	0,17-0,23
Кремний (Si)	0,17-0,37
Марганец (Mn)	0,5-0,8
Никель (Ni)	до 0,3
Сера (S)	до 0,035
Фосфор (P)	до 0,035
Хром (Cr)	0,7-10
Медь (Cu)	до 0,3

3.2 Обоснование выбора рабочих материалов

При подборе композитного материала для восстановления рабочих поверхностей шнека руководствовались следующими соображениями и выводами.

Сформированное покрытие из композитного материала должно обладать высокой износостойкостью и прочностью сцепления покрытия

с основой, так как разрабатываемую технологию предполагается использовать для повышения качества поверхностей деталей АПК при их восстановлении или изготовлении. Кроме того, необходимо учитывать стоимость материала и опыт использования композитных покрытий со схожим набором химических элементов.

Согласно статистическим данным [113, 125], для деталей, работающих в условиях повышенного абразивного изнашивания, а также знакопеременных динамических и ударных нагрузок, наиболее подходящим материалом может служить самофлюсующийся порошок на основе никеля и хрома с флюсующими добавками бора и кремния – ПР-НХ17СР4. Химический состав данного порошка представлен в таблице 3.3 [108].

Согласно исследованиям, элементы, входящие в состав самофлюсующегося порошка ПР-НХ17СР4, при их осаждении на поверхность детали и формировании функционального слоя обеспечивают [113, 133]: Cr (хром) – увеличивает стойкость к различным видам коррозии и окисления, с одновременным увеличением твердости покрытия за счет формирования твердых фаз; В (бор) – способствует формированию твердых фаз, тем самым повышая твердость покрытия; Si (кремний) – применяется для обеспечения самофлюсующихся свойств наносимого покрытия; С (углерод) – образует карбиды с повышенной твердостью, что обеспечивает износостойкость покрытия.

Таблица 3.3 – Химический состав самофлюсующегося сплава ПР-НХ17СР4

Массовая доля элемента, %	
Никель (<i>Ni</i>)	основа
Углерод (<i>C</i>)	1,0
Хром (<i>Cr</i>)	17,0
Кремний (<i>Si</i>)	4,1
Бор (<i>B</i>)	3,6
Железо (<i>Fe</i>)	≤ 5,0

Для достижения необходимой износостойкости восстанавливаемых поверхностей шнека, адгезии и когезии формируемого покрытия, а также устранения существующих технологических недостатков самофлюсующего-

ся порошка ПР-НХ17СР4 было принято решение в качестве наполнителя использовать карбид титана, термодинамические свойства которого представлены в таблице 3.4 [84, 177].

Таблица 3.4 – Термодинамические свойства TiC

Параметры TiC	
Температура плавления, °С	3260±150
Теплота образования из элементов, кДж/К	183,7
Энтропия, кДж/(К×моль)	24,3±0,4
Изменение свободной энергии образования из элементов, кДж/(К×моль)	236,8
Теплоемкость, Дж/(К×моль)	50,57
Температура кипения, °С	4300
Теплопроводность, Вт/мК	39,7

По результатам исследования работы [3], частицы TiC в процессе остывания нанесенного композитного материала на поверхность детали становятся центрами кристаллизации. При этом частицы TiC способствуют выделению твердых фаз CrV и Cr₇C₃ раньше никелевой матрицы.

Введение в матрицу порошка ПР-НХ17СР4 наполнителя – карбида титана (TiC) в рациональном их процентом соотношении уменьшит интенсивность абразивного изнашивания детали и концентрацию напряжений на рабочих поверхностях трения, а также повысит твердость и микротвердость полученного композитного покрытия. Данные параметры полностью соответствуют предъявляемым требованиям к износостойкому покрытию.

3.3 Методика проведения исследований физико-механических свойств композитного покрытия

3.3.1 Определение прочности сцепления композитного покрытия с основой

Прочность сцепления покрытия с основой является одним из основных свойств, которое характеризует качество нанесенного покрытия. Физические

основы прочности сцепления определяются главным образом диффузионными процессами соединения материала подложки и напыляемого материала.

На данный момент разработано большое количество разрушающих и неразрушающих методов для оценки прочности сцепления покрытий с основой. Их подробный анализ приведен в работах [21, 167]. Современное оборудование индентирования поверхности и современные оптические профилометры позволяют соединить простоту существующих методов оценки прочности сцепления покрытия с основой (метод решетчатых надрезов, метод определения прочности при обратном ударе, метод растяжения, метод изгиба, метод карандаша) с точным методом отрыва с помощью цифровой технологии. Данный метод носит название – «скретч тест» [27].



Рисунок 3.3 – Макро Скретч Тестер Revetest Express

В проводимом исследовании прочность сцепления композитного покрытия с основой определялась методом измерительного царапания (методом скретч-тестирования) по ASTM D 2197 [2], ASTM C1624 [1], а также в соответствии с международными стандартами, ISO 19252:2008 [5], ISO 20502 [6].

Царапины проводились алмазным индентором конической формы на установке – Макро Скретч Тестер Revetest Express (рисунок 3.3), что исключает погрешности, связанные с влиянием ориентации граней индентора.

Метод реализовал контролируемое царапание индентором на выбранных участках образцов при заданном режиме нагрузки и длине царапины. Наконечник индентора перемещался по поверхностям образцов с постоянной нагрузкой в 34 Н.

3.3.2 Определение твердости и микротвердости композитного покрытия

На сегодняшний день в области измерения твердости и микротвердости покрытий наиболее точным и удобным методом является измерение вдавливанием алмазного наконечника под действием статической нагрузки. Схема указанного метода приведена на рисунке 3.4.

Твердость композитного покрытия H_v (HRC) измерялась на твердомере ПМТ-3 (рисунок 3.5) при нагрузке 50 Н по ГОСТ 9013-59 (ИСО 6508-86) [44].



Рисунок 3.4 – Схема измерения твердости и микротвердости

Метод определения твёрдости металлов по Роквеллу состоит во вдавливании алмазного конуса в предварительно зашлифованную поверхность образца. Твёрдость по Роквеллу заключается в определении глубины вдавливания. Метод Роквелла считается более оперативным, а в таких твердомерах как ПМТ-3 автоматизируется как процесс испытания, так и последующая обработка его результатов.

Микротвёрдость композитного покрытия (Па) также измерялась на твердомере ПМТ-3 (рисунок 3.5) при нагрузке 10 Н по ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78) [45] в поперечном сечении образца.



Рисунок 3.5 – Твердомер ПМТ-3

Метод определения микротвёрдости покрытия заключается в следующем: алмазный наконечник в форме правильной четырехгранной пирамиды (рисунок 3.4) вдавливают в участок образца под действием нагрузки P_M . После удаления нагрузки измеряют диагонали квадратного отпечатка, оставшегося на поверхности образца. Экспериментальные измерения прово-

дились в 15 точках, а затем производилось вычисление микротвердости по среднеарифметическому результату измерений.

3.3.3 Методика металлографического и рентгеноструктурного анализа композитного покрытия

С помощью рентгеноструктурного и металлографического анализа определялся фазовый состав покрытия и напряжения первого и второго рода для композитного покрытия.

Металлографический анализ производился согласно ГОСТ 1778-70 [40] с использованием оптического микроскопа Axiovert 40 MAT (рисунок 3.6). С целью выявления структурных составляющих композитного покрытия микрошлифы исследовали без предварительного травления.



Рисунок 3.6 – Оптический микроскоп Axiovert 40 MAT

Химический состав покрытия исследовался на искровых оптико-эмиссионных спектрометрах PMI MASTER Pro (рисунок 3.7 а) и ДФС-500 (рисунок 3.7 б).



а)

б)

Рисунок 3.7 – Оптико-эмиссионные спектрометры PMI MASTER Pro и ДФС-500

3.3.4 Определение износостойкости композитного покрытия

Экспериментальные испытания образцов с нанесенным покрытием на абразивное изнашивание проводились на установке – машина трения СМЦ-2 согласно ГОСТ 23.208-79 [41] (рисунок 3.8).

Показатель износостойкости нанесенного покрытия, равный отношению изменений массы эталона и образца, определялся по результатам трех испытаний. В качестве эталона было принято покрытие детали до напыления.

Использовался абразивный материал – электрокорунд зернистостью 16-П по ГОСТ 3647-80 [43] с относительным содержанием влаги не более 0,15%. Для оценки износостойкости использовались прецизионная система для измерения шероховатости, контура и 3D-топографии сложнопрофильных деталей, профилограф и аналитические весы.

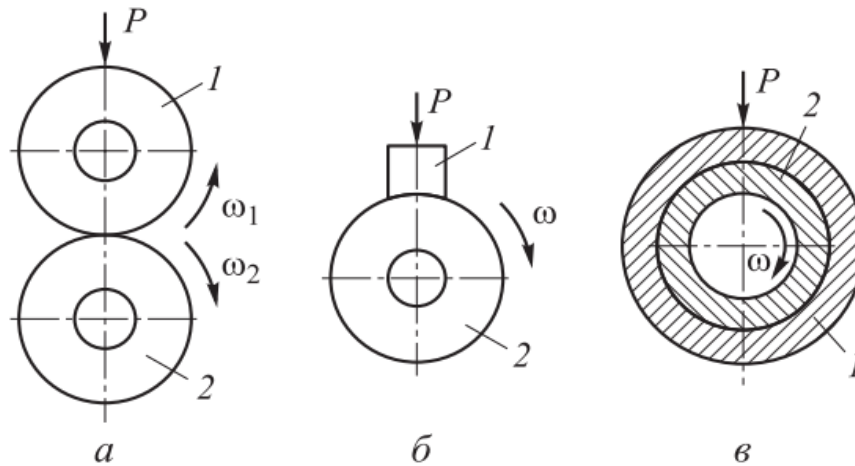


Рисунок 3.8 – Схема моделей взаимодействия фрикционных пар, реализуемых на машине трения СМЦ-2; *а* – диск–диск; *б* – диск–колодка; *в* – вал–втулка; 1 – образец; 2 – контртело; *P* – нагрузка

В ходе исследований методов испытаний деталей на абразивное изнашивание, с целью подробного анализа износостойкости покрытия на базе кафедры «Автоматизированное оборудование машиностроительного производства» ВГТУ и лаборатории ВУНЦ ВВС «ВВА» была разработана машина для испытаний деталей на абразивный износ, на которую получен патент на изобретение № 2702994 от 15.10.2019 г. [129].

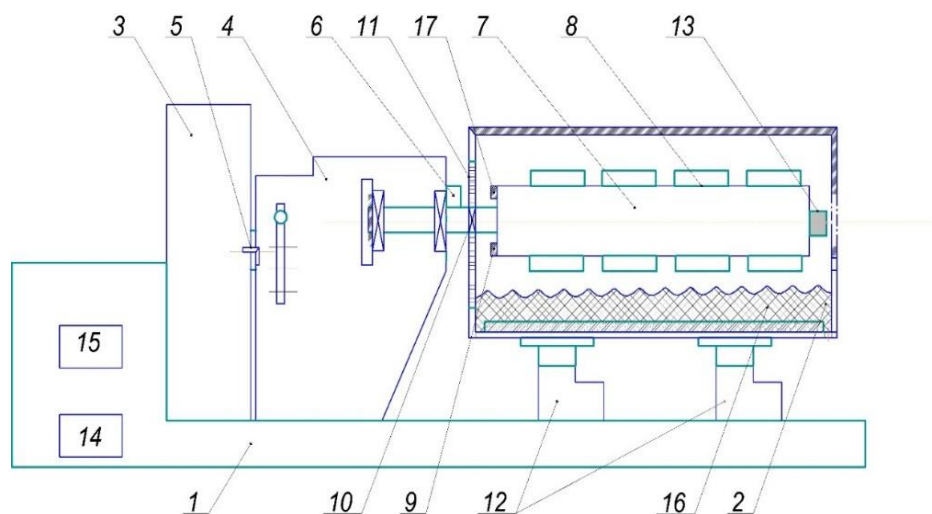


Рисунок 3.9 – Машина для испытания деталей на абразивный износ

Структурная схема машины для испытаний деталей на абразивный износ в варианте исполнения с пневмоцилиндром и вибровозбудителем приведена на рисунке 3.9 [67, 157], где: 1 – станина, 2 – ванна с абразивной смесью, 3 – токарный станок 16К20, 4 – коробка передач, 5 – муфта, 6 – счетчик оборотов, 7 – ротор, 8 – испытываемые образцы, 9 – датчик силы, 10 – подшипник, 11 – кожух, 12 – пневмоцилиндр, 13 – вибровозбудитель, 14 – блок управления, 15 – пульт ввода данных, 16 – абразивная подложка, 17 – датчик вибрации.

Разработанная машина обеспечивает повышение адекватности условий испытаний образцов путем создания реальных динамических взаимодействий между испытываемыми образцами и абразивной средой. Ёмкость с абразивной смесью установлена с возможностью перемещения в вертикальной плоскости по заданной программе, а дно ёмкости с абразивной смесью снабжено подложкой, при этом на торце ротора закреплен вибровозбудитель, датчик вибрации и датчик силы. Степень износа поверхности испытываемых образцов после проведения испытаний определялся взвешиванием и измерением линейных размеров до испытания и после.

3.4 Методика эксплуатационных испытаний восстановленных поверхностей шнека

Эксплуатационные испытания шнеков транспортирующих конвейеров проводились с целью определения показателей их долговечности.

В конвейеры устанавливались новые и восстановленные шнеки, которые обладали геометрическими параметрами, отвечающими требованиям технических условий ТУ 3167-001-00285178-99.

При эксплуатационных испытаниях исследовались следующие технические параметры: износостойкость рабочих поверхностей шнеков, восстановленных плазменным напылением композитным материалом; износостойкость шнеков в сравнении с новым (относительная

износостойкость и сравнительная долговечность исследуемых шнеков); влияние износа на технико-экономические показатели конвейера.

Испытания проводились в четыре этапа [135]:

1-й этап. Разработка методики проведения исследований и планов наблюдений.

2-й этап. Организация наблюдений за конвейерами в процессе проведения эксплуатационных испытаний. Промежуточный контроль износа винтовой и цилиндрической поверхностей шнека в ходе испытаний.

3-й этап. Микрометраж деталей конвейеров при снятии их с эксплуатационных испытаний.

4-й этап. Обработка полученных первичных данных и составление заключений и выводов.

3.5 Выводы по третьей главе

1. Разработаны положения общей методики, а также применены методики для оценки технических характеристик композитного покрытия, нанесенного на рабочие поверхности шнека.

2. Подобраны сертифицированные модели специального оборудования, которые позволяют наносить покрытия с помощью плазменного напыления на рабочие поверхности шнека транспортирующего конвейера.

3. Разработана установка для напыления композитных покрытий на поверхности деталей машин, технической особенностью которой является обеспечение высокой точности перемещения плазмотрона относительно обрабатываемой детали, что приводит к формированию покрытия с высокой прочностью сцепления с основой [130].

4. Разработана машина для испытания деталей на абразивный износ, позволяющая проводить в лабораторных условиях уточненный анализ износостойкости покрытия поверхности деталей, в частности шнека [129].

4 Экспериментальное исследование процесса нанесения композитных покрытий плазменным напылением

4.1 Определение состава композитного материала для нанесения покрытий плазменным напылением

Цель исследований заключалась в определении рационального состава композитного материала на основе порошка ПР-НХ17СР4 с фракцией 40-64 мкм с добавлением наполнителя TiC для нанесения покрытий плазменным напылением, обеспечивающим максимальное значение прочности сцепления покрытия с основой при ударно-абразивном воздействии на поверхность, и соответственно повышенный ресурс эксплуатации деталей. Для достижения поставленной цели был спланирован и реализован многофакторный эксперимент по центральному композиционному рототабельному плану [46].

Подбор параметров плана многофакторного эксперимента производился с учетом итогового получения композитных покрытий с наивысшей прочностью сцепления покрытия с основой шнека из стали 20Х.

В результате были выбраны следующие области варьирования независимых переменных:

размер наполнителя (X_1), мкм	20-70
концентрация наполнителя (X_2), %	15-25

В качестве функции отклика приняли прочность сцепления полученного покрытия с основой, а основными факторами размер дисперсной фазы наполнителя X_1 и концентрацию наполнителя X_2 .

На рисунке 4.1 представлены план центрального композиционного рототабельного плана и результаты многофакторного эксперимента.

Для проведения расчетов применялся программный пакет для статистического анализа «Statistika». В итоге получено уравнение, описывающее зависимость прочности сцепления от размер наполнителя (X_1) и концентрация наполнителя (X_2) композитного материала

$$C = -324,83 + 5,89X_1 + 41,45X_2 - 0,04X_1^2 - 0,88X_2^2 - 0,06X_1X_2. \quad (4.1)$$

	1 Адг. МПа	2 Размер, мкм	3 Концентр , %
1	174	20,00000	15,00000
2	215	20,00000	25,00000
3	232	70,00000	15,00000
4	241	70,00000	25,00000
5	203	9,64466	20,00000
6	245	80,35534	20,00000
7	205	45,00000	12,92893
8	263	45,00000	27,07107
9	274	45,00000	20,00000
10	271	45,00000	20,00000
11	269	45,00000	20,00000

Рисунок 4.1 – Результаты многофакторного эксперимента

Проверка адекватности выбранной модели производилась по критерию Фишера [15, 46]. Полученное уравнение регрессии (4.1) адекватно описывает экспериментальные данные, так как расчетное значение критерия Фишера меньше табличного ($F_p < F_m$). Следовательно, уравнение регрессии адекватно описывает влияние основных факторов процесса на прочность сцепления получаемых покрытий с основой.

Анализ позволил выявить, что связь между прочностью сцепления покрытия с основой и исследуемыми факторами сильная – множественный коэффициент корреляции достигает значения 0,973.

Анализируя корреляционную матрицу, видим, что наибольшее значение на прочность сцепления оказывает концентрация наполнителя (коэффициент корреляции – 5,6). Менее значительно влияет на прочность сцепления размер дисперсной фазы наполнителя (коэффициент корреляции – 3,98).

После проверки значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента [15, 46], выяснилось, что все коэффициенты регрессии, кроме эффектов взаимодействия, оказались значимыми, т.к. вычисленные значения критерия Стьюдента оказались больше критического $t_{крит} = 3,182$ [15]. Регрессионное уравнение окончательно примет следующий вид

$$C = -324,83 + 5,89X_1 + 41,45X_2 - 0,04X_1^2 - 0,88X_2^2. \quad (4.2)$$

Определим центр оптимума полученной функции 4.2. Для этого решим систему уравнений, используя программный комплекс «MathCad»

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} f(X_1, X_2) &\rightarrow 0.08X_1 + 5.89, \\ \frac{d}{dx} f(X_1, X_2) &\rightarrow 1.76X_2 + 41.45. \end{aligned} \quad (4.3)$$

После приведения и преобразования, получим

$$\begin{aligned} 0.08X_1 &= 5.89, \\ 1.76X_2 &= 41.45. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Запишем в матричной форме

$$M := \begin{pmatrix} 0.08 & 0 \\ 0 & 1.76 \end{pmatrix}, v := \begin{pmatrix} 5.89 \\ 41.45 \end{pmatrix}. \quad (4.5)$$

Решая, получим

$$\begin{aligned} \text{soln} &:= \text{lsolve}(M, v), \\ \text{soln} &= \begin{bmatrix} 73.625 \\ 23.551 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Таким образом, найдены координаты оптимума:

$$X_1 = 73,625 \text{ мкм};$$

$$X_2 = 23,551 \text{ \%}.$$

Значение функции отклика в центре оптимума 380,093 МПа.

На рисунке 4.2 показано двумерное сечение поверхности отклика. В результате реализации многофакторного эксперимента получена регрессионная модель в виде полинома второго порядка.

Изображение поверхности отклика регрессионного уравнения в натуральных единицах представлено на рисунке 4.3.

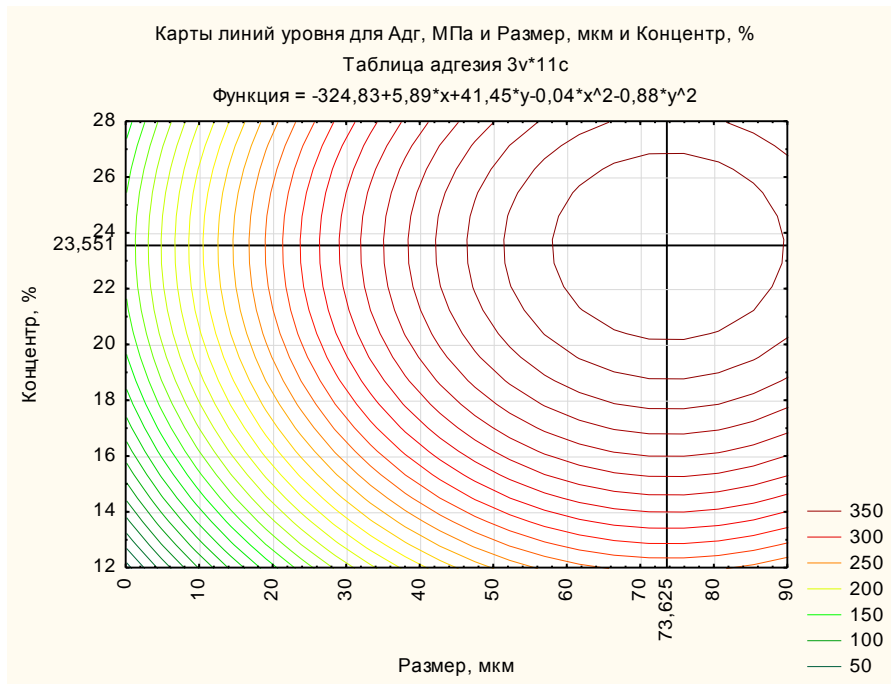


Рисунок 4.2 – Поверхность отклика

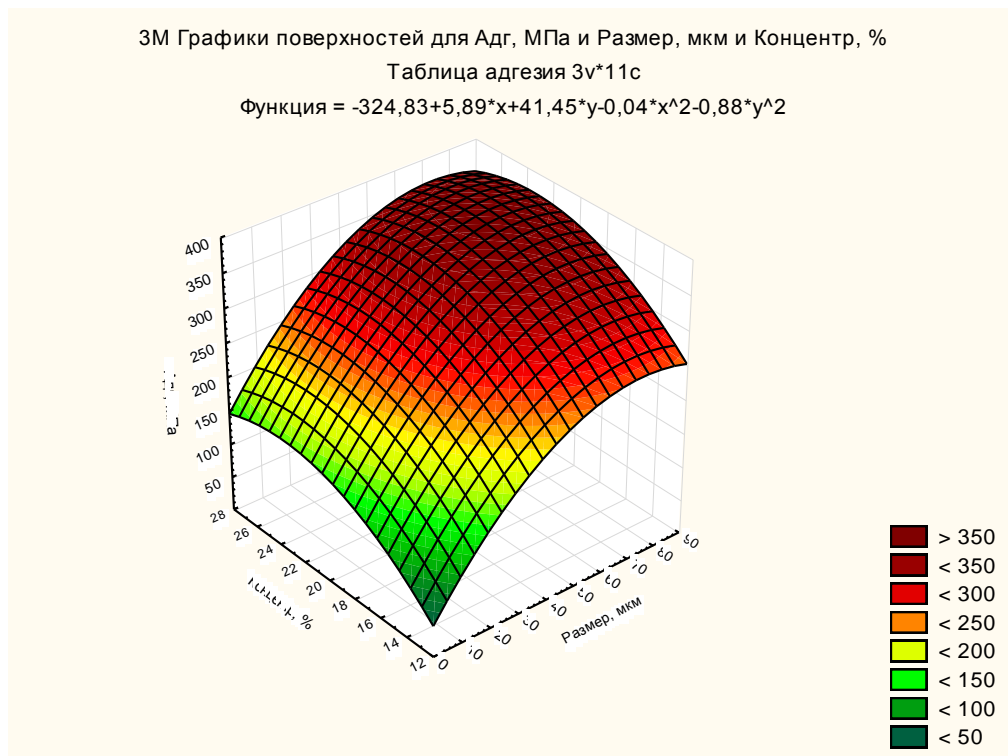


Рисунок 4.3 – Изображение поверхности отклика регрессионного уравнения

На основе анализа двумерного сечения определена область оптимума критерия по наивысшей прочности сцепления покрытия к основе и выбран рациональный состав композитного материала на основе порошка ПР-НХ17СР4: карбид титана фракцией 63-80 мкм (73,6 мкм) – 23,5 %; порошок ПР-НХ17СР4 фракцией 40-64 мкм – 76,5%. Прочность сцепления композитного покрытия к стальной основе при этом составе напыляемого порошка достигает наибольшего значения.

4.2 Определение рациональных технологических режимов нанесения покрытий плазменным напылением

Функцией отклика была выбрана прочность сцепления покрытия с основой, которая представляет собой сложную функцию, изучение которой связано с решением целого ряда задач, а именно:

- 1) Отбор входных параметров процесса нанесения покрытия.
- 2) Планирование и проведение эксперимента.
- 3) Получение регрессионной модели, описывающей зависимость прочности сцепления покрытия с основой от исследуемых факторов.
- 4) Поиск рациональных режимов нанесения покрытия.

Необходимо отметить, что при проведении экспериментальных исследований не учитывался способ подготовки поверхности детали под нанесение покрытия, т.к. задача исследования состояла не в нахождении конкретного значения прочности сцепления покрытия к основе, а в определении режимов напыления, обеспечивающих ее максимальную величину.

В связи с тем, что характер нанесения покрытия на винтовые и цилиндрические поверхности имеет свои особенности, режимы нанесения покрытия делились на две группы:

- 1) Режимы нанесения покрытия на винтовую поверхность.
- 2) Режимы нанесения покрытия на цилиндрическую поверхность.
- С учетом принятых ограничений функциональная зависимость проч-

ность сцепления покрытия к основе в аналитической форме может быть записана в виде:

Для винтовой поверхности: $C_{ВП} = f(I, l, v, Q_G, m_{II})$.

Для цилиндрической поверхности: $C_{ЦП} = f(I, l, n, s, v, Q_G, m_{II})$.

Где: I – ток дуги плазмотрона, А; l – дистанция напыления, м; n – скорость вращения детали (для цилиндрической основы), об/мин; s – подача (для цилиндрической основы), мм/об; v – скорость перемещения плазмотрона (для винтовой основы), мм/мин; Q_G – объемный расход плазмообразующего газа, л/с; m_{II} – массовый расход напыляемого материала, г/с.

Исходя из того, что необходимо получить композитные покрытия преимущественно со сжимающими остаточными напряжениями, то параметры плана эксперимента подбирались из указанного выше условия (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Результаты многофакторного эксперимента

Наименование фактора	Диапазон факторов	Кодовое обозначение фактора
Ток дуги плазмотрона I , А;	200 – 250	X ₁
Дистанция напыления l , мм;	50 – 150	X ₂
Скорость вращения детали (для цилиндрической основы) n , об/мин;	35 – 55	X ₃
Подача (для цилиндрической основы) s , мм/об;	4 – 6	X ₄
Скорость перемещения плазмотрона (для винтовой основы) v , мм/мин;	3 – 7	X ₅
Объемный расход плазмообразующего газа, Q_G , л/с;	0,8 – 1,8	X ₆
Массовый расход напыляемого материала, m_{II} , г/с	0,3 – 0,5	X ₇

После проведения предварительных экспериментов были составлены уровни варьирования факторов (таблица 4.2).

Факторы, учитываемые для винтовой поверхности: X₁, X₂, X₅, X₆, X₇.

Факторы, учитываемые для цилиндрической поверхности: X₁, X₂, X₃, X₄, X₆, X₇.

В ходе проведения предварительного эксперимента и последующего корреляционного анализа, представленного на рисунке 4.4 (для винтовых поверхностей) и рисунке 4.5 (для цилиндрических поверхностей) выяснилось, что в модель влияния технологических параметров плазменного напыления на прочность сцепления покрытия с основой необходимо включать для винтовой поверхности факторы X_1 , X_2 , X_7 , а для цилиндрической поверхности факторы: X_1 , X_2 , X_3 , X_7 .

Таблица 4.2 – Уровни варьирования факторов

Фактор	Нижний уровень	Средний уровень	Верхний уровень
X_1	200	225	250
X_2	50	100	150
X_3	35	45	55
X_4	4	5	6
X_5	3	5	7
X_6	0,8	1,3	1,8
X_7	0,3	0,4	0,5

Переменная	Корреляции (Таблица данных3) Отмеченные корреляции значимы на уровне $p < ,05000$ N=32 (Построчное удаление ПД)							
	Средние	Ст.откл.	У	X_1	X_2	X_5	X_6	X_7
У	308,5000	14,44902	1,000000	0,632846	-0,492214	-0,281265	0,316423	-0,421898
X_1	225,0000	25,40003	0,632846	1,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
X_2	100,0000	50,80005	-0,492214	0,000000	1,000000	0,000000	0,000000	0,000000
X_5	5,0000	2,03200	-0,281265	0,000000	0,000000	1,000000	-0,000000	0,000000
X_6	1,3000	0,50800	0,216423	0,000000	0,000000	-0,000000	1,000000	-0,000000
X_7	0,4000	0,10160	-0,421898	0,000000	0,000000	0,000000	-0,000000	1,000000

Рисунок 4.4 – Корреляционный анализ влияния технологических параметров плазменного напыления на прочность сцепления покрытия с основой на винтовых поверхностях

Переменная	Корреляции (Таблица данных21) Отмеченные корреляции значимы на уровне $p < .05000$ N=64 (Построчное удаление ПД)								
	Средние	Ст.откл.	У	X1	X2	X3	X4	X6	X7
У	316,5000	14,90712	1,000000	0,608511	-0,473286	-0,304256	-0,236643	0,304256	0,405674
X1	225,0000	25,19763	0,608511	1,000000	0,000000	-0,000000	0,000000	0,000000	0,754623
X2	100,0000	50,39526	-0,473286	0,000000	1,000000	-0,000000	0,000000	0,000000	-0,000000
X3	45,0000	10,07905	-0,304256	-0,000000	-0,000000	1,000000	0,000000	0,000000	-0,000000
X4	5,0000	1,00791	-0,236643	0,000000	0,000000	0,000000	1,000000	-0,000000	-0,000000
X6	1,3000	0,50395	0,204256	0,000000	0,000000	0,000000	-0,000000	1,000000	-0,000000
X7	0,4000	0,10079	0,405674	0,754623	-0,000000	-0,000000	-0,000000	-0,000000	1,000000

Рисунок 4.5 – Корреляционный анализ влияния технологических параметров плазменного напыления на прочность сцепления покрытия с основой на цилиндрических поверхностях

Как видно из результатов анализа, мультиколлинеарность факторов для винтовой поверхности не выявлена, а при исследовании влияния параметров нанесения на прочность сцепления покрытия с основой на цилиндрической поверхности, установлена мультиколлинеарная связь между параметрами X_1 и X_7 .

Согласно теории эксперимента, из модели исключается менее значимый параметр [15], следовательно, параметр X_7 необходимо исключить из модели. Таким образом, установлено, что при исследовании прочности сцепления покрытия с основой на цилиндрической поверхности будут учитываться следующие факторы: X_1 , X_2 , X_3 .

Эффект	Оценки параметров (Регрессия адгезия плоск нов) Сигма-ограниченная параметризация									
	Сц Парам.	Сц Ст.Ош.	Сц t	Сц p	-95,00% Дов.Пр.	+95,00% Дов.Пр.	Сц Beta (B)	Сц Ст.Ош.В	-95,00% Дов.Пр.	+95,00% Дов.Пр.
Св. член	306,3750	0,235702	1299,839	0,000000	305,8753	306,8747				
I, A	8,3750	0,235702	35,532	0,000000	7,8753	8,8747	0,869299	0,024465	0,817436	0,921163
I, мм	-3,9583	0,235702	-16,794	0,000000	-4,4580	-3,4587	-0,410863	0,024465	-0,462727	-0,358999
m, г/с	-1,7917	0,235702	-7,601	0,000001	-2,2913	-1,2920	-0,185970	0,024465	-0,237833	-0,134106
I, A*I, мм	1,3750	0,235702	5,834	0,000025	0,8753	1,8747	0,142721	0,024465	0,090857	0,194585
I, A*m, г/с	0,8750	0,235702	3,712	0,001893	0,3753	1,3747	0,090822	0,024465	0,038958	0,142686
I, мм*m, г/с	-0,4583	0,235702	-1,945	0,069625	-0,9580	0,0413	-0,047574	0,024465	-0,099437	0,004290
I, A*I, мм*m, г/с	0,2083	0,235702	0,884	0,389848	-0,2913	0,7080	0,021624	0,024465	-0,030239	0,073488

Зависим. Перемен.	SS модели и SS остатков (Регрессия адгезия плоск нов)										
	Множеств R	Множеств R2	Скоррект R2	SS Модель	сс Модель	MS Модель	SS Остаток	сс Остаток	MS Остаток	F	p
Сц	0,995200	0,990423	0,986233	2206,292	7	315,1845	21,33333	16	1,333333	236,3884	0,000000

Рисунок 4.6 – Регрессионный анализ влияния режимов нанесения покрытий на прочность сцепления покрытия с основой на винтовых поверхностях шнека

В ходе проведения регрессионного анализа по влиянию технологических параметров напыления композитного покрытия на его прочность сцепления с основой на винтовых поверхностях были получены следующие данные, представленные на рисунке 4.6.

В результате анализа данных можно записать регрессионное уравнение в кодированных значениях

$$C_{вп} = 306,37 + 8,37I - 3,95l - 1,79m + 1,37Il + 0,87Im - 0,45Im + 0,21Ilm. \quad (4.7)$$

Проверка адекватности модели показала, что она адекватна, т.к. расчетный критерий Фишера $F_p = 1,986$ оказался меньше табличного $F_{табл} = 3,2$ [15]. Таким образом, условие $F_p < F_{табл}$ выполняется.

Анализ позволил выявить, что зависимость наносимого композитного покрытия плазменным напылением от исследуемых факторов не линейная, а связь между ними сильная – множественный коэффициент корреляции достигает значения 0,995 (рисунок 4.6).

Анализируя корреляционную матрицу, видим, что наибольшее значение на прочность сцепления покрытия с основой оказывает сила тока дуги плазматрона. Менее значительно влияют дистанция напыления и расход наплавленного материала, далее в порядке убывания расположились взаимодействие силы тока и дистанции напыления, силы тока и расхода материала, дистанции напыления и расхода наплавленного материала, и сочетания перечисленных факторов.

После проверки значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента [15, 46], выяснилось, что все коэффициенты регрессии, кроме эффектов взаимодействия дистанции напыления и расхода наплавленного материала, а также всех трех факторов, оказались значимыми, т.к. вычисленные значения критерия Стьюдента оказались больше критического $t_{крит.} = 2,12$ [15, 46].

Таким образом, скорректированное уравнение регрессии в кодированных значениях будет иметь вид

$$C_{VII} = 306,37 + 8,37I - 3,95l - 1,79m + 1,37Il + 0,87Im. \quad (4.8)$$

После проведения анализа факторов, таких как сила тока дуги, дистанция напыления, массовый расход напыляемого материала, на прочность сцепления покрытия с основой видно, что с увеличением тока дуги прочность сцепления наносимого покрытия с основой увеличивается, что объясняется лучшим проплавлением порошка при его нанесении на поверхность. Характер изменения прочности сцепления композитного покрытия, состоящего из порошка ПР-НХ17СР4 и TiC, с основой в зависимости от дистанции напыления показан на рисунке 4.7.

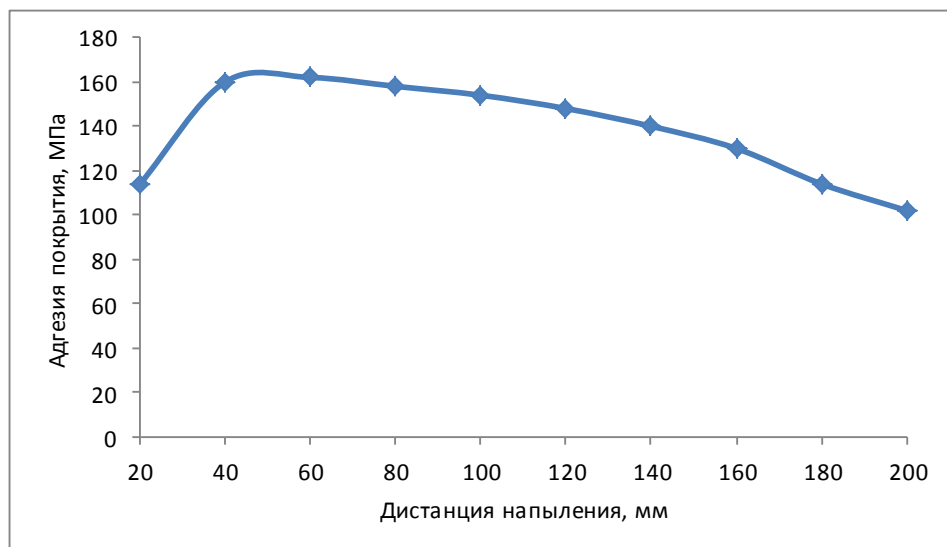


Рисунок 4.7 – Зависимость прочности сцепления покрытия с основой от дистанции напыления

Видно, что общая тенденция не противоречит исследованиям, приведенным в работах авторов [100, 111, 132, 142]. Однако, видно, что на начальном этапе с ростом дистанции напыления в исследованном диапазоне происходит незначительное повышение прочности сцепления. Это объясняется

тем, что дистанция напыления должна выбираться из условия, что подложка расположена в зоне, где начинается остывание частиц, при этом не происходит перегрев основы плазменной струей [77, 78, 80].

В рассматриваемом диапазоне увеличение дистанции напыления приводит к незначительному повышению прочности сцепления, что является следствием падения скорости твердых не оплавленных частиц карбида титана по длине струи, приводящим к падению ударного давления и, как следствие, исключению эффекта «волны», приводящего к отрыву еще не остывшего слоя покрытия от основы.

При дальнейшем увеличении дистанции напыления происходит падение скорости частиц по длине струи, приводящим к падению ударного давления на напыляемую поверхность, процесс теплообмена становится менее интенсивным, что влечет падение температуры напыляемых частиц, а этот эффект, в свою очередь, приводит к снижению прочности сцепления.

Что касается массового расхода напыляемого материала, то необходимо также заметить, что на величину прочности сцепления оказывает влияние и расход напыляемого материала. Данные теоретических выкладок, подтвержденные экспериментальными исследованиями, показали, что при минимальном расходе порошка получается более прочное покрытие. С ростом концентрации частиц в плазменной струе интенсивность процесса теплообмена увеличивается, и средняя температура напыляемых частиц падает, что приводит к снижению прочности сцепления и качества покрытия в целом.

Данные выводы хорошо иллюстрируются визуализацией функций желательности, полученных в ходе графической интерпретации регрессионной зависимости, которая представлена на рисунке 4.8.

Для производства более удобно пользоваться регрессионным уравнением в раскодированном виде, т.к. оно позволяет непосредственно рассчитывать технологические параметры нанесения покрытий.

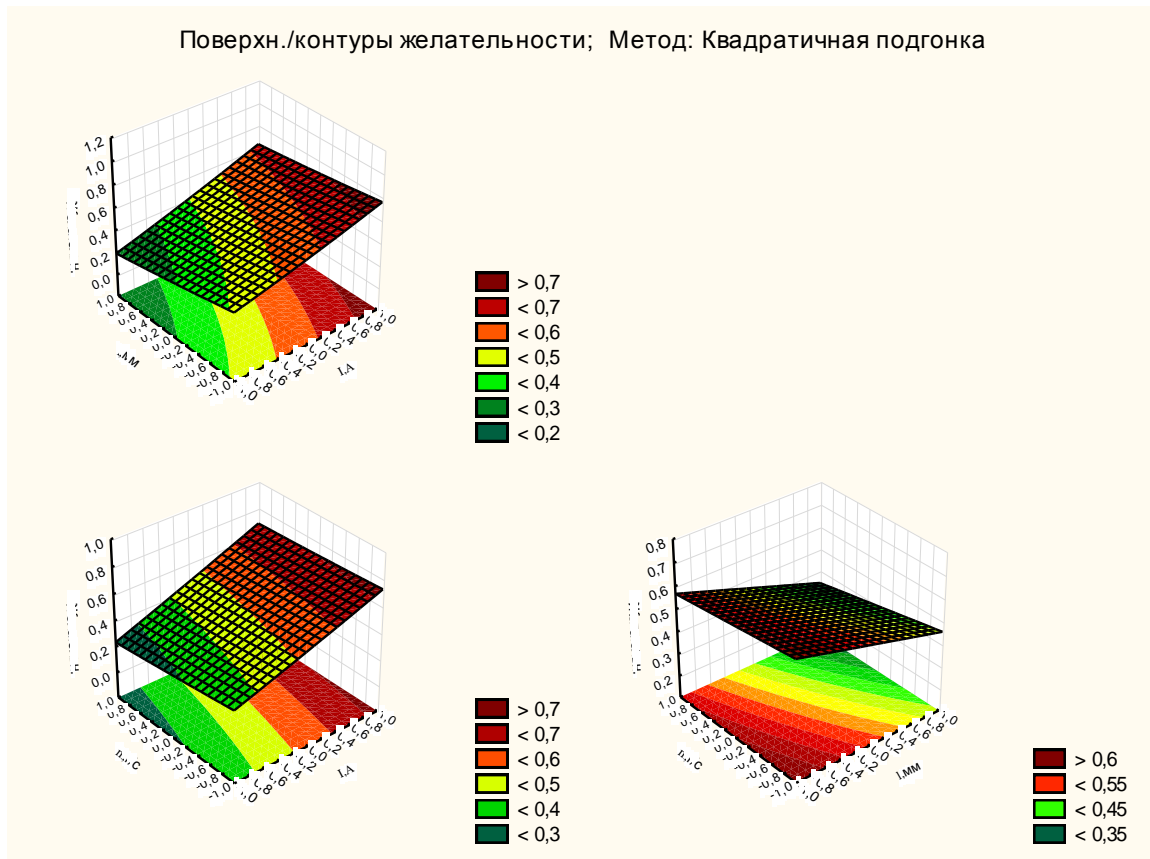


Рисунок 4.8 – Визуализация функций желательности

Перейдем в полученном регрессионном уравнении от кодированных к натуральным значениям.

Получаем

$$C_{ВП} = 302,082 + 0,086I - 0,33l - 96,2m + 0,0011l + 0,348Im. \quad (4.9)$$

Уравнение 4.9 описывает зависимость прочности сцепления покрытия к винтовой основе в зависимости от технологических режимов его нанесения.

В ходе проведения регрессионного анализа по влиянию параметров нанесения композитного покрытия на прочность сцепления покрытия с основой на цилиндрических поверхностях были получены следующие данные, представленные на рисунке 4.9.

В результате анализа данных можно записать регрессионное уравнение в кодированных значениях

$$C_{III} = 297,12 + 27,79I - 13,95I^2 - 4,21n + 1,04II - 0,04In - 1,62ln + 1,21Iln. \quad (4.10)$$

Проверка адекватности модели показала, что она адекватна, т.к. расчетный критерий Фишера $F_p = 0,376$ оказался меньше табличного $F_{табл} = 3,2$ [15, 46]. Таким образом, условие $F_p < F_{табл}$ выполняется.

Эффект	Оценки параметров (Таблица данных33) Сигма-ограниченная параметризация									
	Сц Парам.	Сц Ст.Ош.	Сц t	Сц р	-95,00% Дов.Пр.	+95,00% Дов.Пр.	Сц Beta (B)	Сц Ст.Ош.В	-95,00% Дов.Пр.	+95,00% Дов.Пр.
Св. член	297,1250	1,080123	275,0843	0,000000	294,8352	299,4148				
I,A	27,7917	1,080123	25,7301	0,000000	25,5019	30,0814	0,875018	0,034008	0,802926	0,947111
I,мм	-13,9583	1,080123	-12,9229	0,000000	-16,2481	-11,6686	-0,439477	0,034008	-0,511570	-0,367384
n,мин-1	-4,2083	1,080123	-3,8962	0,001284	-6,4981	-1,9186	-0,132499	0,034008	-0,204592	-0,060406
I,A*I,мм	1,0417	1,080123	0,9644	0,349198	-1,2481	3,3314	0,032797	0,034008	-0,039296	0,104890
I,A*n,мин-1	-0,0417	1,080123	-0,0386	0,969706	-2,3314	2,2481	-0,001312	0,034008	-0,073405	0,070781
I,мм*n,мин-1	-1,6250	1,080123	-1,5045	0,151947	-3,9148	0,6648	-0,051163	0,034008	-0,123256	0,020930
I,A*I,мм*n,мин-1	1,2083	1,080123	1,1187	0,279783	-1,0814	3,4981	0,038044	0,034008	-0,034049	0,110137

Зависим. Перемен.	SS модели и SS остатков (Таблица данных33)										
	Множеств R	Множеств R2	Скоррект R2	SS Модель	сс Модель	MS Модель	SS Остаток	сс Остаток	MS Остаток	F	p
Сц	0,990705	0,981496	0,973400	23762,62	7	3394,661	448,0000	16	28,00000	121,2379	0,000000

Рисунок 4.9 – Регрессионный анализ влияния режимов нанесения покрытий на прочность сцепления покрытия с основой на цилиндрических поверхностях шнека

Анализ позволил выявить, что зависимость наносимого композитного покрытия плазменным методом от исследуемых факторов не линейная, а связь между ними сильная – множественный коэффициент корреляции достигает значения 0,99 (рисунок 4.9).

Анализируя корреляционную матрицу, видим, что наибольшее значение на прочность сцепления покрытия с основой оказывает сила тока дуги плазмотрона. Затем по ослаблению влияния факторы, влияющие на величину прочности сцепления покрытия с основой расположились следующим образом: дистанция напыления, скорость вращения детали, взаимодействия силы тока и дистанции напыления, взаимодействия дистанции напыления и скорости вращения детали, сочетания всех трех факторов, сочетания тока дуги плазмотрона и скорости вращения детали.

После проверки значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента [15, 46], выяснилось, что коэффициенты регрессии при факторах

взаимодействия оказались не значимыми, т.к. вычисленные значения критерия Стьюдента оказались больше критического $t_{крит.} = 2,12$ [15].

Таким образом, скорректированное уравнение регрессии в кодированных значениях будет иметь вид

$$C_{цп} = 297,12 + 27,79I - 13,95I - 4,21n. \quad (4.11)$$

Из анализа влияния исследуемых факторов на прочность сцепления покрытия с основой следует, что с увеличением тока дуги прочность сцепления наносимого покрытия с основой увеличивается, что объясняется эффективным проплавлением порошка при его нанесении на цилиндрическую поверхность детали.

Данные выводы хорошо иллюстрируются визуализацией функций желательности, полученных в ходе графической интерпретации регрессионной зависимости, которая представлена на рисунке 4.10.

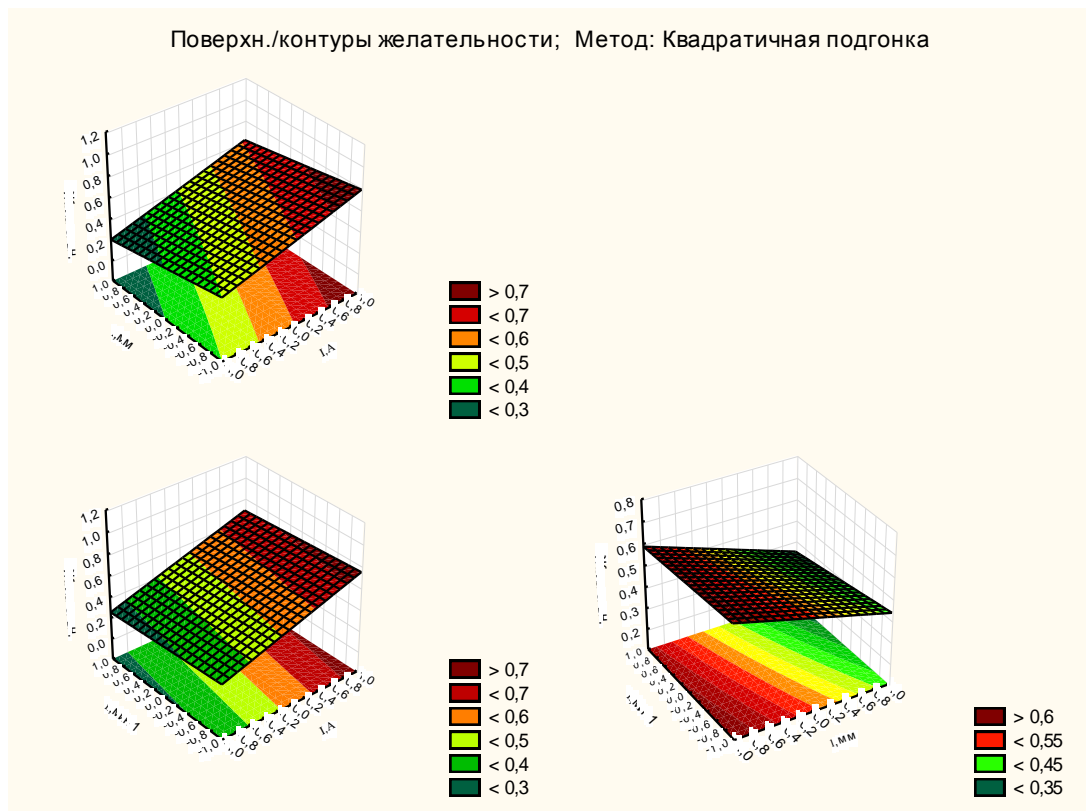


Рисунок 4.10 – Визуализация функций желательности

Для производства более удобно пользоваться регрессионным уравнением в раскодированном виде, т.к. оно позволяет непосредственно рассчитывать технологические параметры нанесения покрытий. Перейдем в полученном регрессионном уравнении от кодированных к натуральным значениям.

Получаем

$$C_{\text{цп}} = 93,86 + 1,11I - 0,28l - 0,42n. \quad (4.12)$$

Уравнение (4.12) описывает зависимость прочность сцепления покрытия с цилиндрической основой шнека в зависимости от технологических режимов его напыления.

Таким образом, получены модели, описывающие зависимость прочности сцепления композитного покрытия с основой в зависимости от геометрических характеристик последней.

Однако шнеки транспортирующих конвейеров не являются прецизионными деталями, и поэтому в целях рационального использования производственных площадей, станочного парка и материальных ресурсов, на ремонтных предприятиях шнеки, как правило, восстанавливают за один проход. Происходит одновременное воздействие на цилиндрические и винтовые поверхности детали.

В связи с этим, возникает необходимость провести рациональный подбор параметров нанесения композитных покрытий, удовлетворяющих нанесению покрытия, как на винтовые, так и на цилиндрические поверхности шнека.

Из ранее проведенных исследований выявлены зависимости прочности сцепления покрытия с основой на винтовой (4.9) и цилиндрической поверхностях шнека (4.12).

При решении поставленной задачи использовался программный комплекс «MathCad» (приложение Б). Преобразование полученных данных производилось в программе «Excel» (приложение Б). Все условия выбора параметров нанесения покрытий были соблюдены.

Таким образом при нанесении композитных покрытий плазменным напылением назначаются следующие технологические режимы напыления, удовлетворяющие нанесению покрытия, как на винтовые, так и на цилиндрические поверхности шнека: сила тока дуги плазмотрона, дистанция напыления, массовый расход напыляемого материала, скорость вращения детали (для цилиндрической поверхности).

Основываясь на данных, представленных в приложении Б, видно, что диапазон режимных параметров напыления при напряжении на дуге в 260 В (сила тока дуги плазмотрона, дистанция напыления, массовый расход напыляемого материала, скорость вращения детали) удовлетворяет заданным технологическим условиям [23] (таблица 4.3).

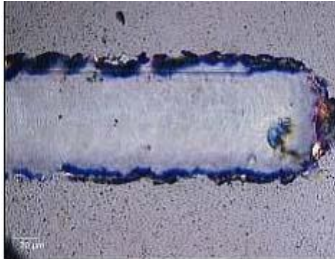
Таблица 4.3 – Технологические режимы плазменного напыления

	I , А	l , мм	m , г/с	n , мин ⁻¹
max	248	83	0,5	37
min	233	81	0,4	35

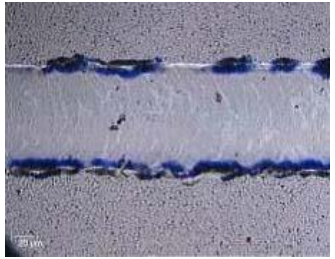
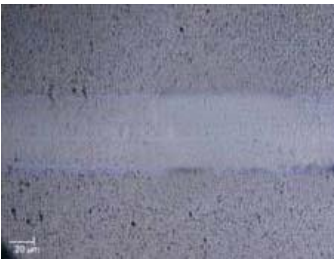
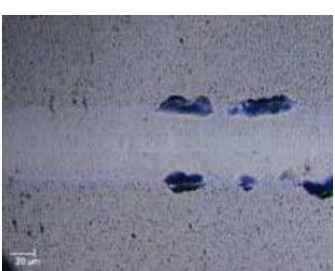
4.3 Исследование прочности сцепления получаемых композитных покрытий с основой

С целью подтверждения теоретических изысканий об прочности сцепления покрытия с основой было проведено исследование адгезионной прочности методом скрэтч тестирования (таблица 4.4) [27].

Таблица 4.4 – Результаты исследований прочности сцепления покрытия с основой

№ образца	Тип покрытия	Нагрузка, Н	Внешний вид покрытия
1	ПР-НХ17СР4	34	

Продолжение таблицы 4.4 – Результаты исследований прочности сцепления покрытия с основой

№ образца	Тип покрытия	Нагрузка, Н	Внешний вид покрытия
2	ПР-НХ17СР4+18%TiC	34	
3	ПР-НХ17СР4+23,5%TiC	34	
4	ПР-НХ17СР4+30%TiC	34	

В таблице 4.4 представлены изображения царапины на исследуемых покрытиях при одинаковой нагрузке. Видно, что наибольшие следы разрушения наблюдаются у покрытия из порошка ПР-НХ17СР4, что сопровождается увеличением акустической эмиссии при этой нагрузке. Затем по мере повышения прочности сцепления покрытия с основой следует покрытие ПР-НХ17СР4+30 %TiC, покрытие ПР-НХ17СР4+18 %TiC и покрытие ПР-НХ17СР4+23,5 %TiC, у которого практически не наблюдалось разрушения. Кроме того, у покрытий № 1, 2, 4 происходило когезионное разрушение путем растрескивания в плоскости, перпендикулярной направлению роста покрытия от края, что выражалось в образовании трещин внутри царапин у при заданной нагрузке. Следует отметить, что у покрытия № 3 трещин не наблюдалось на всем протяжении испытаний.

Исследование поперечного шлифа покрытий показало, что наличие

трещин в стандартном покрытии снижает общий ресурс изделия т.к. трещина имеет возможность распространения в основной металл под покрытием, что в конечном итоге приводит к разрушению детали. Покрытие ПР-НХ17СР4+23,5 %TiC не образует трещин при нанесении и эксплуатации на всем протяжении испытаний.

4.4 Исследование твердости получаемых композитных покрытий

На основании изучения данных исследований [23, 34, 47], для деталей транспортирующих устройств, прошедших восстановление плазменным напылением функциональных материалов, одной из основных характеристик, обеспечивающих надежную работу, является твердость получаемых покрытий, величина которой зависит от множества факторов [62].

Исходя из вышеизложенного, был проведен регрессионный анализ, где функцией отклика уравнения регрессии была выбрана твердость покрытия, H_v , (HRC).

Твердость измерялась на образцах по методике, описанной в главе 3, п. 3.3.2. Внешний вид поверхности образца после измерения твердости представлен на рисунке 4.11.



Рисунок 4.11 – Поверхность образца после измерения твердости

В результате области варьирования независимых переменных были выбраны диапазоны варьирования технологических режимов напыления, представленные в таблице 4.1.

Для изучения влияния режимов напыления на твердость получаемых покрытий применялся метод регрессионного анализа [46], для чего на основании экспериментальных данных была построена матрица планирования, содержащая зависимую и независимые переменные. Одним из условий этого метода является предположение о функциональной независимости варьируемых переменных. Для оценки этого положения проводился корреляционный анализ.

Анализируя предварительный эксперимент и матрицы коэффициентов парной корреляции [46], был сделан вывод о необходимости включения в модель таких факторов исследуемого процесса, как: ток дуги плазматрона, дистанция напыления, массовый расход напыляемого материала. Остальные факторы процесса оказались не значимы или мультиколлинеарны.

В результате проведенного корреляционного анализа были выбраны следующие независимые переменные и области их варьирования (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Независимые переменные и области их варьирования

Фактор	Нижний уровень	Средний уровень	Верхний уровень
X ₁	200	225	250
X ₂	50	100	150
X ₇	0,3	0,4	0,5

В ходе подбора математической модели, наиболее точно описывающей исследуемый процесс, стало ясно, что наилучшим образом описывает исследуемый процесс линейная модель со свободным членом, т.к. для нее коэффициент детерминированности имеет наибольшее значение.

Полученная модель подвергалась проверке на адекватность согласно критерию Фишера [15, 46]. Модель считалась адекватной, если $F_p < F_{кр}$. Для полученной модели данное условие выполняется, следовательно, уравнение регрессии адекватно описывает влияние основных факторов разработанного процесса на твердость получаемых покрытий.

Эффект	Оценки параметров (Таблица данных21) Сигма-ограниченная параметризация									
	Hv Парам.	Hv Ст.Ош.	Hv t	Hv p	-95,00% Дов.Пр.	+95,00% Дов.Пр.	Hv Beta (B)	Hv Ст.Ош.В	-95,00% Дов.Пр.	+95,00% Дов.Пр.
Св. член	65,01250	0,030334	2143,237	0,000000	64,94820	65,07680				
I,A	0,55417	0,030334	18,269	0,000000	0,48986	0,61847	0,830488	0,045459	0,734119	0,926857
I,мм	0,32083	0,030334	10,577	0,000000	0,25653	0,38514	0,480809	0,045459	0,384440	0,577178
m,г/с	0,10417	0,030334	3,434	0,003407	0,03986	0,16847	0,156107	0,045459	0,059738	0,252475
I,A*I,мм	-0,03750	0,030334	-1,236	0,234209	-0,10180	0,02680	-0,056198	0,045459	-0,152567	0,040170
I,A*m,г/с	-0,05417	0,030334	-1,786	0,093115	-0,11847	0,01014	-0,081176	0,045459	-0,177544	0,015193
I,мм*m,г/с	0,06250	0,030334	2,060	0,056007	-0,00180	0,12680	0,093664	0,045459	-0,002705	0,190033
I,A*I,мм*m,г/с	0,03750	0,030334	1,236	0,234209	-0,02680	0,10180	0,056198	0,045459	-0,040170	0,152567

Зависим. Перемен.	SS модели и SS остатков (Таблица данных21)										
	Множеств R	Множеств R2	Скоррект R2	SS Модель	сс Модель	MS Модель	SS Остаток	сс Остаток	MS Остаток	F	p
Hv	0,983329	0,966936	0,952470	10,33292	7	1,476131	0,353333	16	0,022083	66,84367	0,000000

Рисунок 4.12 – Результаты расчета пошаговой множественной регрессии

В результате расчета пошаговой множественной регрессии (рисунок 4.12) с применением пакета научных подпрограмм «Statistika» получено уравнение в кодированных значениях, описывающее зависимость твердости от исследуемых факторов

$$Hv = 65,01 + 0,55I + 0,32l + 0,1m - 0,03Il - 0,05Im + 0,06Im + 0,04IIm. \quad (4.13)$$

Выявлено, что зависимость твердости от исследуемых факторов линейная, а связь между ними сильная – множественный коэффициент корреляции достигает значения 0,98.

В ходе работы по анализу корреляционной матрицы, видим, что по степени влияния на твердость напыляемого слоя исследуемые факторы расположились в порядке убывания в следующей последовательности: сила тока, дистанция напыления, массовый расход напыляемого материала.

Проверка коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента [15, 46], показала, что все коэффициенты регрессии, кроме их взаимодействий оказались значимыми, т.к. вычисленные значения критерия Стьюдента оказались больше критического $t_{крит.} = 2,776$ [15].

На практике более удобно пользоваться регрессионным уравнением в раскодированном виде, т.к. оно позволяет непосредственно рассчитывать

технологические параметры нанесения покрытий. Перейдем в полученном регрессионном уравнении от кодированных к натуральным значениям.

Получаем

$$Hv = 59,02 + 0,022I + 0,0064l + m. \quad (4.14)$$

Для технологических расчетов удобнее пользоваться трехмерными диаграммами в натуральных значениях, представленными на рисунках 4.13-4.15.

Приведенные диаграммы позволяют на стадии проектирования технологического процесса прогнозировать твердость получаемого покрытия в зависимости от режимов его нанесения.

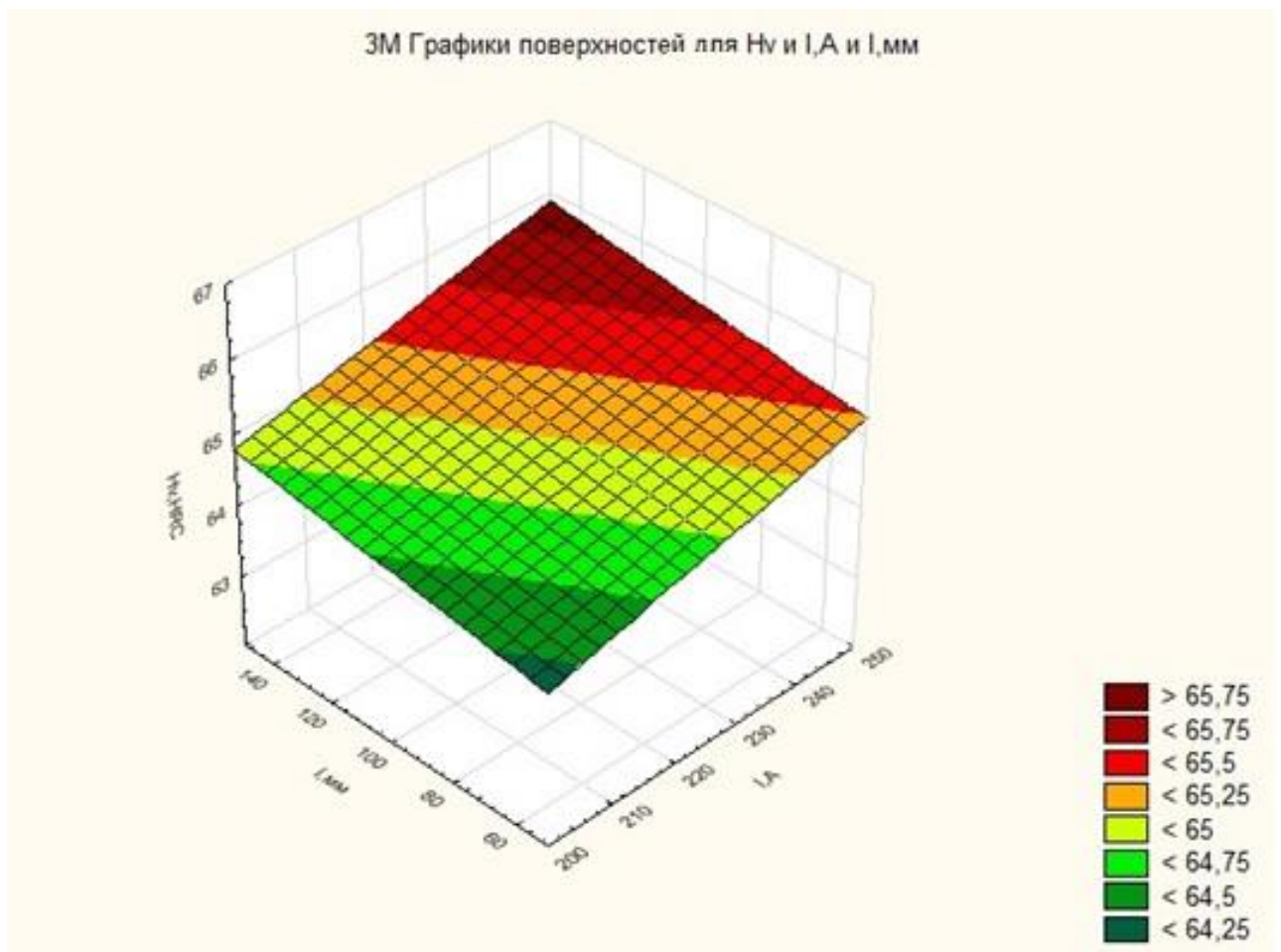


Рисунок 4.13 – Трехмерная диаграмма в натуральных значениях № 1

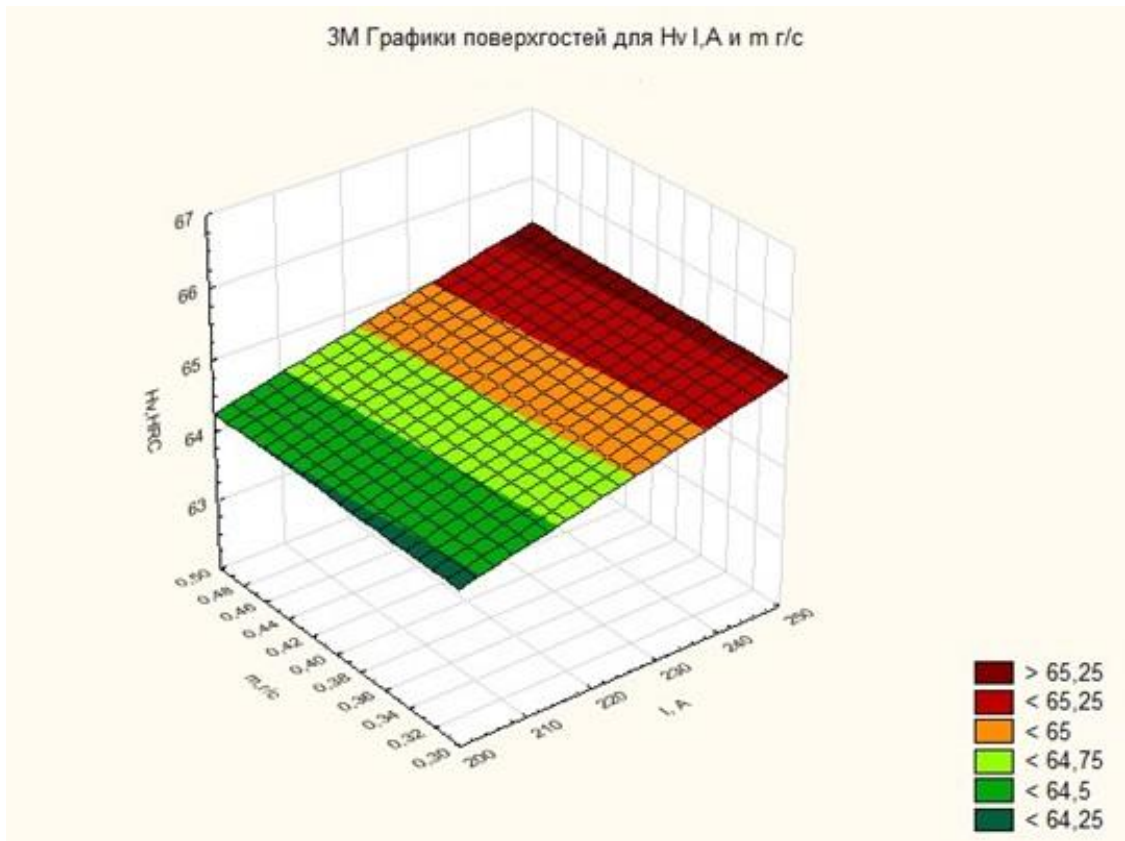


Рисунок 4.14 – Трехмерная диаграмма в натуральных значениях № 2

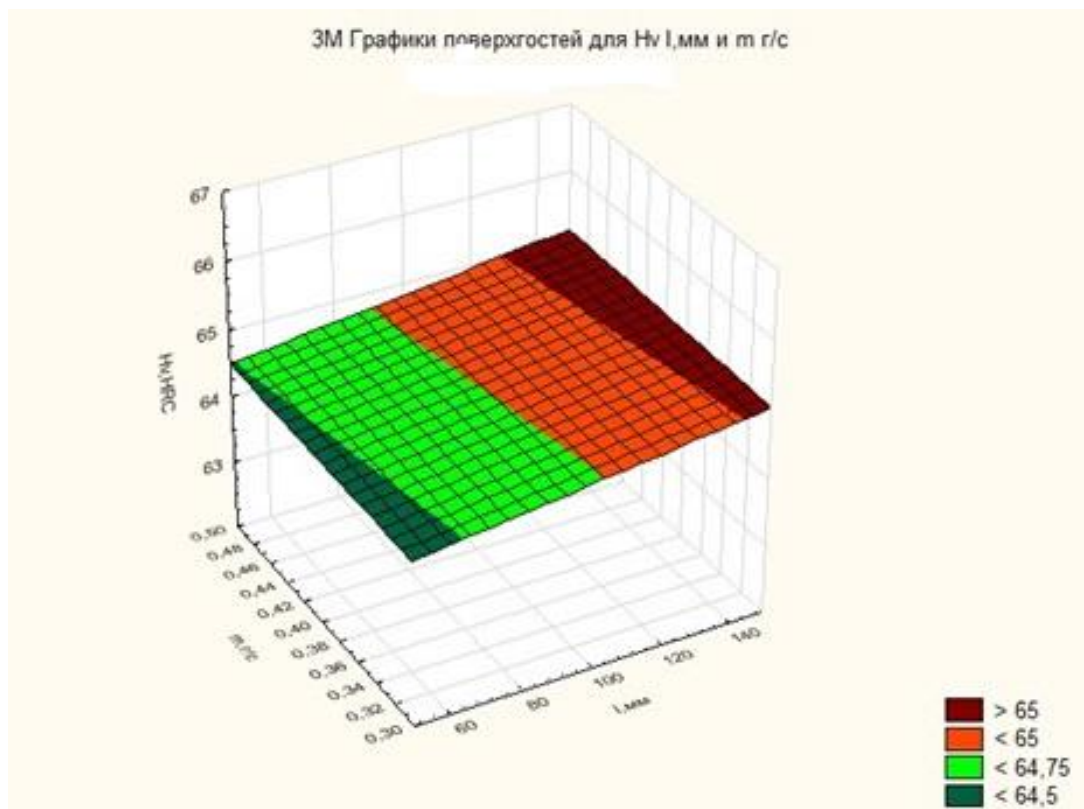


Рисунок 4.15 – Трехмерная диаграмма в натуральных значениях № 3

На рисунке 4.16 представлена графическая интерпретация регрессионного уравнения (4.14) в виде функции желательности, позволяющая визуально оценить характер и степень влияния независимых переменных процесса на значения исследуемого параметра.

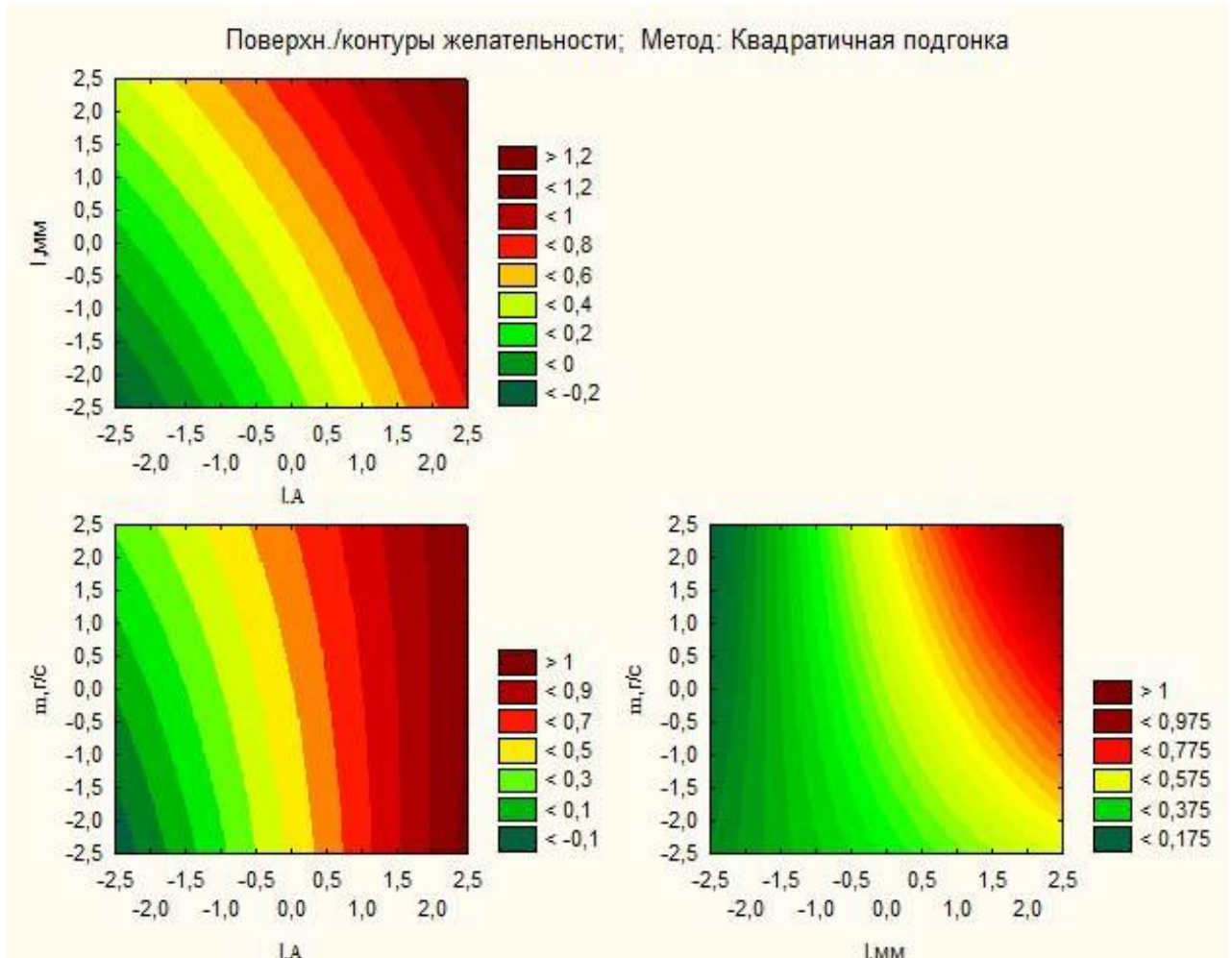


Рисунок 4.16 – Функция желательности

4.5 Исследование микротвердости покрытий

Измерение микротвердости проводилось в соответствии с методикой, изложенной в главе 3 п. 3.3.2. Результаты измерений представлены в таблице 4.6. Внешний вид образца, подвергнутого исследованиям, показан на рисунке 4.17.

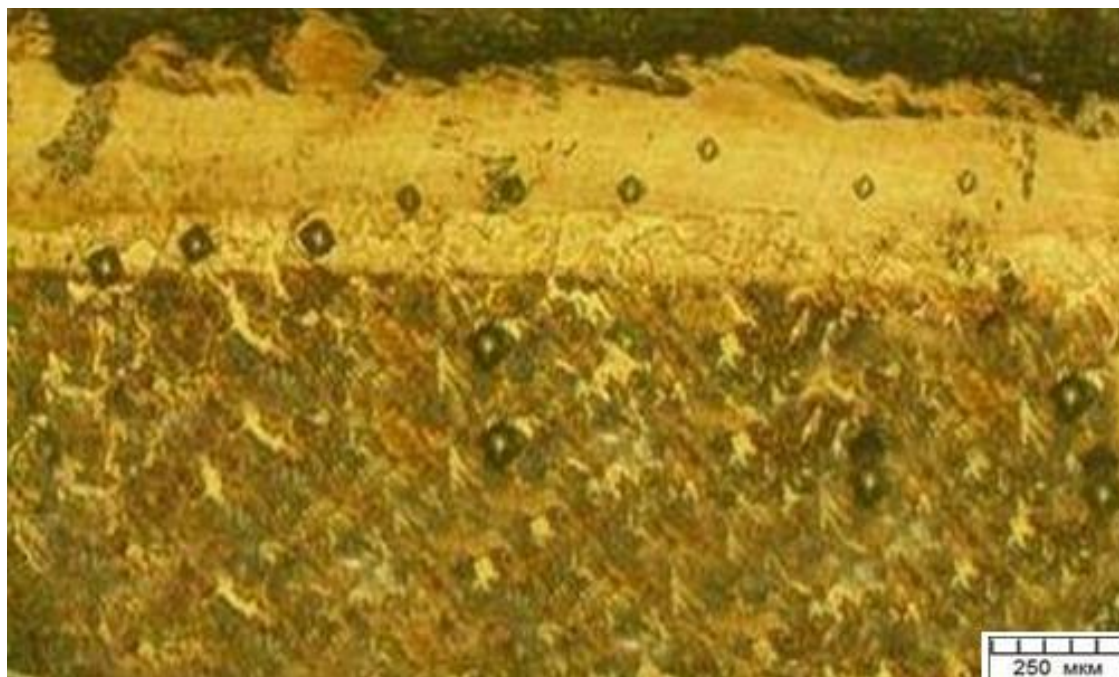


Рисунок 4.17 – Внешний вид образца после проведения измерений на микротвердость

Таблица 4.6 – Результаты измерений микротвердости

Расстояние от поверхности, мм	ПР-НХ17СР4, ГПа	ПР-НХ17СР4 + TiC, ГПа	
		легир.	композ.
0,05	10,57	12,14	15,11
0,1	10,61	12,21	15,08
0,15	10,55	11,98	14,91
0,2	10,46	11,59	14,77
0,25	10,18	11,27	14,63
0,3	9,93	11,02	14,22
0,35	9,51	10,64	13,98
0,4	8,78	10,26	13,74
0,45	7,82	9,82	13,41
0,5	7,02	9,23	13,23
0,55	6,12	8,48	12,96
0,6	5,41	7,61	12,28
0,65	4,82	6,62	11,89
0,7	3,74	5,93	11,12
0,75	3,08	5,24	10,74
Среднее	7,906667	9,602667	13,47133

На рисунке 4.18 представлена графическая интерпретация проведенных исследований. Из рисунка 4.18 видно, что микротвердость всех типов покрытий уменьшается по глубине слоя. На графике представлены аппроксимационные зависимости изменения микротвердости для каждого из исследуемых типов покрытия.

Анализ данных (таблица 4.6) позволяет видеть, что микротвердость композитных покрытий из ПР-НХ17СР4+TiC в 1,4 раза выше, чем микротвердость легированных покрытий ПР-НХ17СР4+TiC и в 1,7 раза выше, чем микротвердость стандартных покрытий ПР-НХ17СР4. Это объясняется наличием твердых включений TiC в покрытии.

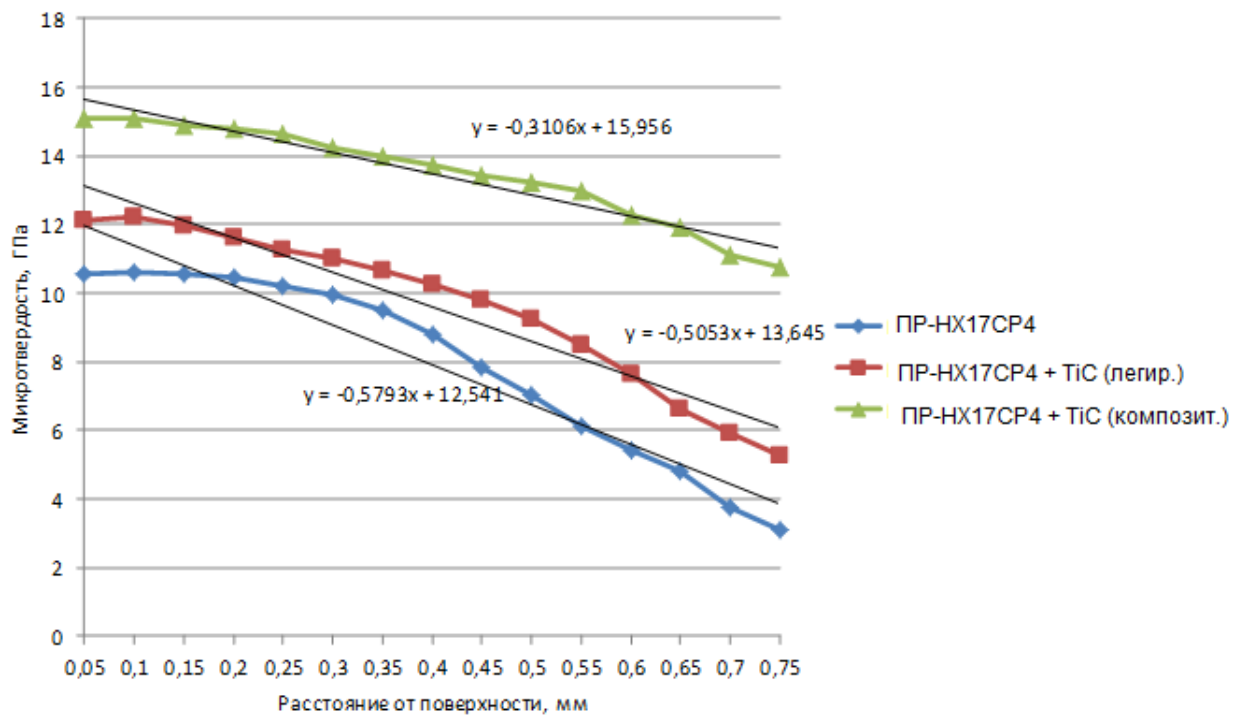


Рисунок 4.18 – Графическая интерпретация проведенных исследований микротвердости покрытий

Из графика, изображенного на рисунке 4.18, видно, что наилучшей равномерностью микротвердости покрытия в зависимости от его толщины обладает композитное покрытие из ПР-НХ17СР4+TiC. По сравнению с ним, скорость изменения микротвердости в зависимости от его толщины выше у легированных покрытий ПР-НХ17СР4+TiC в 1,64 раза, а у стандартных покрытий ПР-НХ17СР4 в 1,87 раза.

Высокое значение микротвердости, и ее малая скорость падения по глубине слоя покрытия могут быть объяснены наличием локальных матриц наклепа в покрытии, создаваемыми включениями TiC. Кроме того,

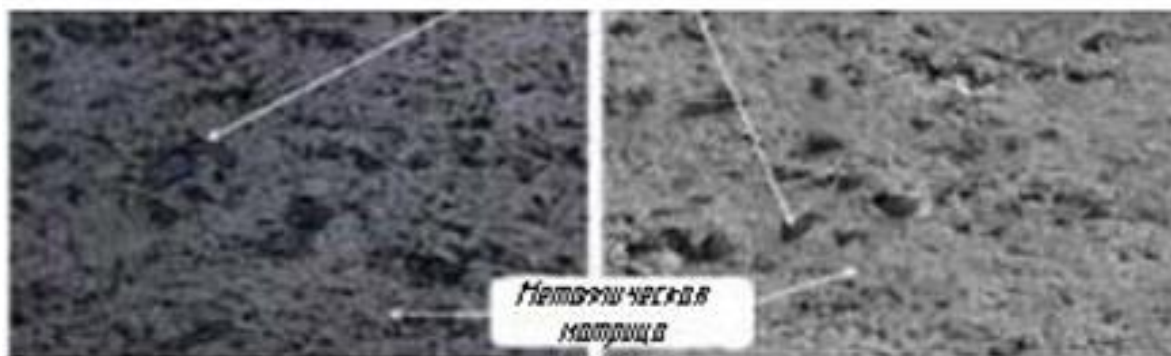
неплотная упаковка структуры покрытия, способствует образованию значительного количества оксидов, которые на практике дают дополнительный вклад в увеличение общей микротвердости покрытия.

4.6 Исследование микроструктуры композитного покрытия

Как показали результаты испытаний на износостойкость покрытий значительное влияние оказывает строение структуры покрытия.

Структура покрытия из материала ПР-НХ17СР4+23,5%ТiС, представленная на рисунке 4.19, состоит из никелевой основы с равномерно расположенными мелкими включениями карбида титана, которые находятся с ней в достаточно прочной связи. В результате трения о закрепленный абразив происходит упрочнение никелевой основы за счет смещения и вминания включений карбида титана. Подтверждением этого факта является повышение твердости покрытия в сравнении с исходной после трения об абразив.

Нерасплавившиеся частицы TiC



а)

б)

Рисунок 4.19 – Структура композитного покрытия

а) – оптическая микроскопия; б) растровая электронная микроскопия

Как показали металлографические исследования, у образцов с классическим покрытием ПР-НХ17СР4, используемым для упрочнения контактных

поверхностей деталей, твердость уменьшается от периферии вглубь образца. В связи с этим, как только происходит изнашивание верхнего слоя покрытия, обнажается менее упрочненный слой и интенсивность изнашивания резко возрастает. В отличие от этого, образцы с покрытием композитным материалом ПР-НХ17СР4+23,5%ТiС имели значительно меньший износ в связи с тем, что структура нанесенного слоя по глубине имела твердость почти такую же, как и верхний слой. Поэтому по мере износа верхних слоев твердость покрытия практически не изменялась и интенсивность послойного износа практически не менялась.

На рисунке 4.20 представлен поперечный шлиф с нанесенным покрытием ПР-НХ17СР4+23,5%ТiС.

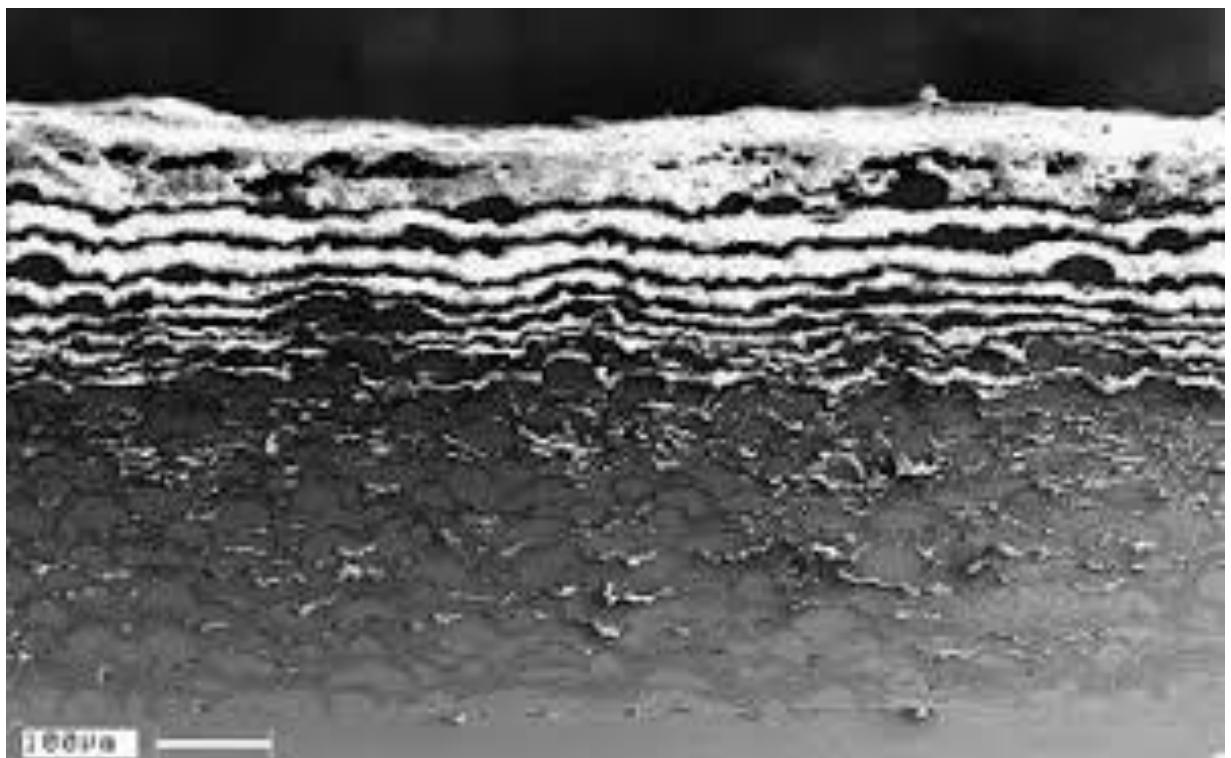


Рисунок 4.20 – Поперечный шлиф покрытия ПР-НХ17СР4+23,5%ТiС

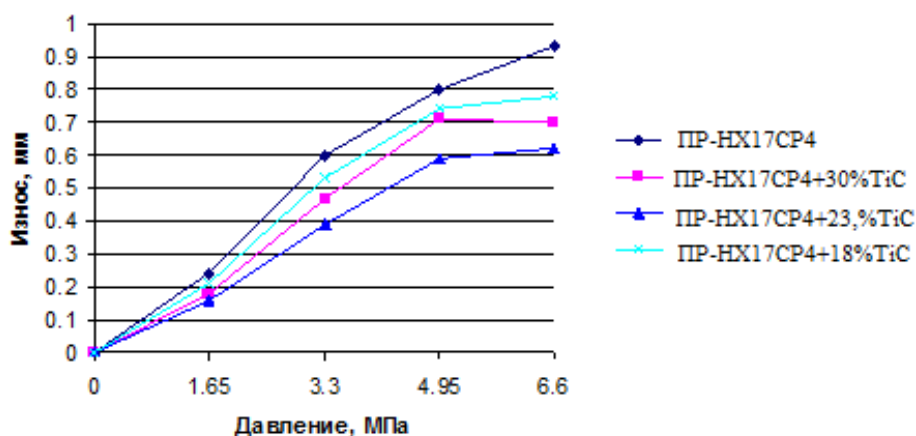
На рисунке 4.20 отчетливо видна характерная слоистая структура покрытия, вызванная особенностью технологии ее нанесения. На всех исследуемых образцах отслоения покрытий от основы не наблюдалось. Дефекты нанесенного слоя в виде трещин, локальных отслоений, крупных пор

на образцах не обнаружено. Микрошлиф характеризуется высокой плотностью, равномерностью структуры, низкой пористостью, отсутствием трещин и высокой прочностью сцепления покрытия с основой.

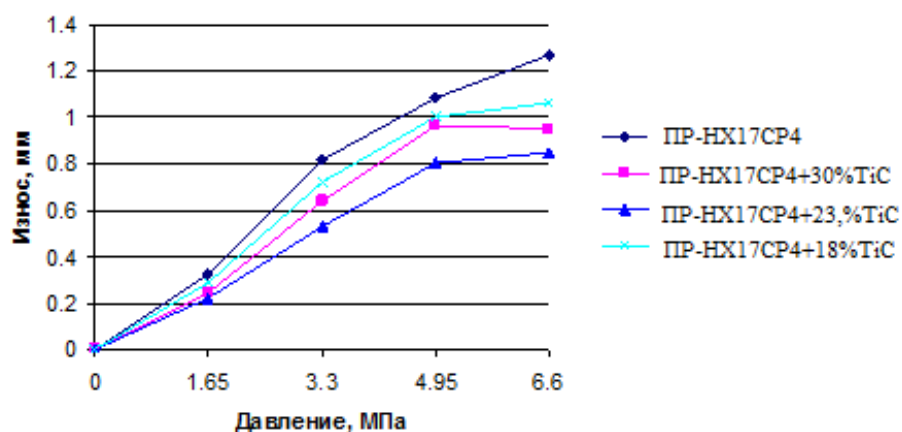
4.7 Исследование износостойкости композитных покрытий

Лабораторные исследования образцов с нанесенными покрытиями плазменным методом проводили в соответствии с методикой, изложенной в п. 3.3.4 настоящей работы.

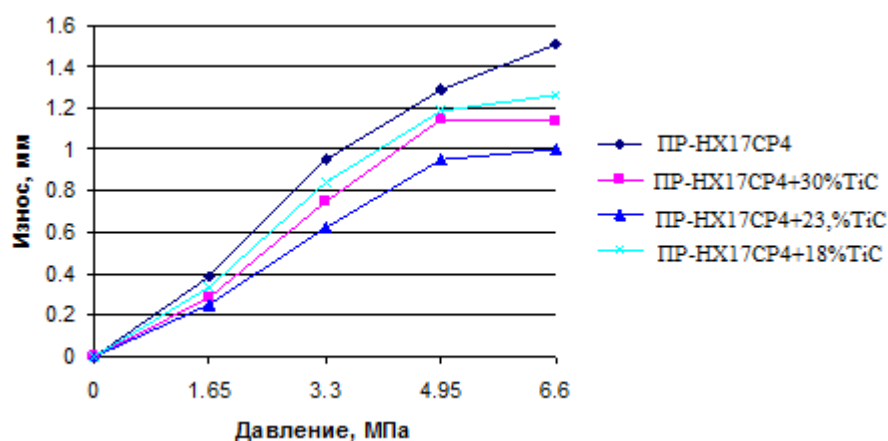
На рисунке 4.21 (а, б, в) представлены графики, выражающие зависимость износа испытываемых образцов от давления при различных скоростях скольжения.



а)



б)



в)

Рисунок 4.21 – Зависимость износа образцов от нагрузки и скорости вращения диска: а) – 0,3 м/с; б) – 0,5 м/с; в) – 0,7 м/с

Из рисунка 4.21 видно, что для всех испытуемых покрытий с увеличением давления и скорости скольжения износ возрастает, однако у покрытия ПР-НХ17СР4+23,5%ТiС в меньшей степени, чем у остальных.

Согласно ГОСТ 23.208-79 [41] для каждого исследуемого типа покрытия было проведено три повторных опыта с разными образцами. Параллельно были проведены исследования износостойкости образцов из стали 20Х. Результаты исследований представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Независимые переменные и области их варьирования

Материал покрытия	Масса образца до испытаний, г	Время испыт., мин	Масса образца после испыт., г	Потеря массы, г	Средняя потеря массы, г	Относительная износостойкость
Сталь 20Х	102.71	10	102.639	0.071	0.071	1
	103.44		103.37	0.07		
	104.31		104.238	0.072		
ПР-НХ17СР4	107.86	10	107.806	0.054	0.053	1.349440994
	108.62		108.568	0.052		
	102.34		102.285	0.055		
ПР-НХ17СР4+18%ТiС	105.66	10	105.613	0.047	0.046	1.901785714
	104.28		104.232	0.048		
	107.83		107.785	0.045		

Продолжение таблицы 4.7 – Независимые переменные и области их варьирования

Материал покрытия	Масса образца до испытаний, г	Время испыт., мин	Масса образца после испыт., г	Потеря массы, г	Средняя потеря массы, г	Относительная износостойкость
ПР-НХ17СР4+23,5%TiC	108.24	10	108.212	0.028	0.026	3.39721519
	109.83		109.806	0.024		
	110.25		110.223	0.027		
ПР-НХ17СР4+30%TiC	110.87	10	110.838	0.032	0.033	2.7264
	108.63		108.595	0.035		
	107.27		107.237	0.033		

Проводя анализ износа исследуемых покрытий, можно утверждать, что износостойкость композитного покрытия ПР-НХ17СР4+23,5 %TiC превосходит аналогичный показатель у покрытия ПР-НХ17СР4 в 2,52 раза, покрытия ПР-НХ17СР4+18 %TiC в 1,79 раза, у покрытия ПР-НХ17СР4+30 %TiC в 1,25 раза.

Таким образом, теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что износостойкость композитного покрытия возрастает при увеличении содержания в нем наполнителя в виде карбида титана до 23,5%, а затем снова начинает снижаться.

Такой экстремальный характер зависимости износостойкости композитного покрытия от содержания в нем наполнителя в виде TiC можно объяснить следующим образом. Использование добавок TiC в покрытии позволяет уменьшить остаточные напряжения в них, которые приводят к разрушению при применении смесей стандартных порошков. Однако при значительном содержании TiC в подаваемом к напылению порошке наблюдается снижение износостойкости покрытия. Полученные результаты можно объяснить тем, что неполное проплавление частиц из-за значительной разницы их теплоемкости по отношению к порошку, формирующему матрицу, приводит к охрупчиванию и увеличению пористости. Тем самым снижается микротвердость покрытия и его износостойкость.

Опираясь на полученные результаты по исследованию износостойкости композитного покрытия ПР-НХ17СР4+23,5%TiC на рабочих поверхностях детали, эксплуатационный ресурс шнека и конвейера в целом возрастет в 1,6-1,7 раза.

4.8 Выводы по четвертой главе

1. Определена область оптимума критерия по наивысшей прочности сцепления покрытия с основой, и на основании полученных данных выбран рациональный состав композитного материала:

карбид титана фракцией 63-80 мкм (73,6 мкм) – 23,5 %;

порошок ПР-НХ17СР4 фракцией 40-64 мкм – 76,5%.

2. Определены технологические режимы плазменного напыления композитного покрытия ПР-НХ17СР4+ 23,5% TiC для винтовой и цилиндрической поверхностей шнека при напряжении на дуге 260 В:

сила тока дуги плазмотрона 233...248 А, дистанция напыления 81...83 мм, массовый расход напыляемого материала 0,4...0,5 г/с, скорость вращения детали 35...37 мин⁻¹ (для цилиндрической поверхности), подача 4...6 мм/об (для цилиндрической поверхности), скорость перемещения плазмотрона 3...7 мм/мин (для винтовой поверхности), объемный расход плазмообразующего газа 0,8...1,8 л/с.

3. В ходе исследования адгезионной прочности методом скрэтч тестирования выявлено, что наибольшая прочность сцепления покрытия с основой наблюдается у покрытия ПР-НХ17СР4+23,5%TiC, затем по мере их уменьшения следует ПР-НХ17СР4+18%TiC, ПР-НХ17СР4+30%TiC и ПР-НХ17СР4, что сопровождалось увеличением акустической эмиссии при постоянной нагрузке. У покрытия ПР-НХ17СР4+23,5% TiC трещин при нанесении и эксплуатации на всем протяжении испытаний не наблюдалось.

4. Выявлено, что на твердость композитного покрытия в порядке убывания влияют: сила тока I , дистанция напыления l , массовый расход напыляемого материала m_n . На основе технологических режимов напыления, оказывающих влияние на твердость покрытия, составлены регрессионные уравнения и построены графики в виде функций желательности, позволяющие визуально оценить характер и степень влияния зависимых переменных процесса на значения исследуемого параметра.

5. Исследование микротвердости показало, что композитное покрытие из ПР-НХ17СР4+TiC в 1,4 раза выше, чем микротвердость легированных покрытий ПР-НХ17СР4+TiC и в 1,7 раза выше, чем микротвердость стандартных покрытий ПР-НХ17СР4. При этом изменение микротвердости по глубине покрытия выше чем у легированных покрытий ПР-НХ17СР4+TiC в 1,64 раза, а у стандартных покрытий ПР-НХ17СР4 в 1,87 раза. Это объясняется наличием твердых включений TiC в покрытии.

6. Выявлено, что износостойкость полученного композитного покрытия в 2,52 раза превосходит упрочняющий слой легированного покрытия из порошка ПР-НХ17СР4.

7. На основе полученных регрессионных моделей, позволяющих оценить и спрогнозировать получение покрытий с необходимыми физико-механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками, построены графические трехмерные диаграммы, позволяющие без предварительных расчетов назначать рациональные технологические режимы плазменного нанесения композитных покрытий на восстанавливаемые поверхности детали.

5 Технология восстановления плазменным напылением износостойких композитных покрытий

5.1 Основные положения технологического процесса по восстановлению рабочих поверхностей шнеков

Технология плазменного напыления функциональных покрытий изменяется в зависимости от материала обрабатываемой детали и от типа используемых химических элементов композитного материала [160]. При этом технологическую схему для деталей эксплуатирующихся с износом пары трения «тело-контрело», где контрело – абразивный материал, можно разбить условно на две части: подготовка поверхности к обработке (восстановлению); нанесение композитного покрытия плазменным напылением.

Первая часть технологического процесса – подготовка к нанесению композитного покрытия является весьма трудоемкой и наименее автоматизированной, поэтому именно данный процесс является одним из основополагающих факторов, влияющих на получение качественного функционального покрытия. Вторая часть технологического процесса – нанесение композитных покрытий плазменным напылением является многофакторным процессом и требует от инженерного и рабочего персонала проведение предварительных расчетов с последующим точным назначением режимов напыления.

Операционная технология восстановления рабочих поверхностей шнека транспортирующего конвейера АПК представлена в приложении В.

5.2 Оборудование для осуществления плазменного напыления композитных покрытий на рабочие поверхности шнека

В ходе восстановительных операций, а именно подготовки поверхности к напылению для проведения дробеструйной обработки рабочих поверх-

ностей шнека согласно ГОСТ 31335-2006 [42] использовалась дробеструйная камера BML-RC (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 – Мобильная дробеструйная камера BML-RC

Технические характеристики мобильной дробеструйной камеры BML-RC представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Технические характеристики установки

Внутренние размеры камеры	Соответствует внутреннему размеру контейнера
Тип дробеструйной камеры	Тупиковая
Количество постов обработки	По выбору заказчика
Подготовка воздуха для дыхания	Да
Производительность очистки каждым оператором	при степени очистки по Sa 2 ½ 10-18 м²/час
Потребление сжатого воздуха	при давлении воздуха 6 бар и диаметре сопла 8 мм: 4 м³/мин
Сбор абразивного материала	автоматический или полуавтоматический
Освещенность	300-500 люкс
Потребление электроэнергии	в зависимости от габаритов
Система регенерации фильтров	автоматическая
Уровень шума	внутри камеры достигает величины 100 дБА, вне камеры - менее 80 дБА
Режим работы камеры	непрерывный, с учетом времени на загрузку-выгрузку деталей и удаления остатков абразива

Главным преимуществом данной установки является её изготовление из необходимых защитных устройств, обеспечивающих безопасную работу обслуживающего персонала и операторов в соответствии с правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок и сосудов, работающих под давлением.

Для осуществления процесса плазменного напыления композитных покрытий использовалась установка плазменного напыления УПУ-3Д (рисунок 5.2), технические характеристики которой приведены в таблице 3.1.



Рисунок 5.2 – Установка плазменного напыления УПУ-3Д

Технологические режимы плазменного напыления композитного покрытия ПР-НХ17СР4+23,5%TiC на установке плазменного напыления УПУ-3Д с плазмотроном ПНК-50 с межэлектродной вставкой представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Технологические режимы плазменного напыления композитного покрытия ПР-НХ17СР4+23,5%TiC

Технологические режимы напыления	Интервалы значений
Ток дуги плазмотрона I , А;	233 – 248
Дистанция напыления l , мм;	81 – 83
Скорость вращения детали (для цилиндрической основы) n , об/мин;	35 – 37
Подача (для цилиндрической основы) s , мм/об;	4 – 6
Скорость перемещения плазмотрона (для винтовой основы) v , мм/мин;	3 – 7
Объемный расход плазмообразующего газа, Q_r , л/с;	0,8 – 1,8
Массовый расход напыляемого материала, $m_{пл}$, г/с	0,4 – 0,5

Поскольку винтовая часть шнека является тонкостенной, то при её обработке (особенно в местах у кромок, где температура поверхности увеличивается ввиду отражения тепловых волн), одновременно с напылением композитного материала проводилось её охлаждение водно-дисперсной струей. Для этого использовалась универсальная система подачи СОЖ Universal CB-13L (рисунок 5.3).



Рисунок 5.3 – Система подачи СОЖ Universal CB-13L

Универсальная система подачи СОЖ Universal CB-13L предназначена для оборудования различных металлообрабатывающих станков (сверлильных, фрезерных, токарных, ленточнопильных, плоскошлифовальных и др.), а также для обеспечения охлаждения поверхностей деталей при их обработке газотермическим способом нанесения функциональных покрытий.

5.3 Экономическое обоснование эффективности разработанной технологии

Объектом производства является шнек транспортирующего конвейера, который работает в условиях абразивного изнашивания (микрорезание, упругий контакт, пластический контакт, адгезионное взаимодействие, когезионный отрыв) ввиду перемещения насыпных материалов машиностроительного и сельскохозяйственного назначения.

Для повышения износостойкости и микротвердости рабочих поверхностей шнека и с целью его восстановления необходимо наносить композитные покрытия газотермическим способом – плазменным напылением. В данной работе предложен метод плазменного нанесения покрытий из композитного материала (76,5 % ПР-НХ17СР4+ 23,5 % TiC).

Поскольку производство шнеков – это процесс, которым занимается небольшое число узкоспециализированных предприятий, то годовая программа выпуска принята равной 1534 детали. Технологический процесс включает в себя операции представленные в приложении В.

Для обоснования экономической эффективности разработанной технологии нанесения композитного материала плазменным напылением на изношенные рабочие поверхности шнека с целью их восстановления была использована методика, описанная в работе Милковой О.И. [118].

В работах [37, 86] изложены экономические основы функционирования машиностроительного предприятия и организации производства, что непосредственно относится к области нанесения функциональных покрытий

на поверхности деталей машин.

На основе приведенной методики были проведены расчеты нормы времени для всех операций восстановления шнеков, нормы восстанавливаемых шнеков за смену (7 шнеков), годовой программы восстановления шнеков (1534 шнека).

При назначении транспортных устройств для перемещения шнеков транспортирующего конвейера внутри цеха руководствовались: стоимостью и надежностью выбранных машин, видом грузов, путями их перемещения, весом и геометрией поверхностей, планировкой цеха и т.д. Учитывая большинство из приведенных факторов, были выбраны автопогрузчики в количестве 2 штук.

Оборудование располагаем в последовательности выполнения операций с учетом удобных подходов к рабочим местам. Площадь участка составляет 180 м² (длина 15 метров, ширина 12 метров).

Опираясь на планируемый объем рабочего времени и величину годового выпуска восстановленных шнеков была рассчитана явочная численность рабочих (2 человека) и списочная численность (3 человека) технического персонала. На основе полученных данных было просчитано количество всех видов рабочего персонала (приложение Г).

Расчет необходимых инвестиций для осуществления и внедрения разработанной технологии восстановления шнеков проводился с учетом количества и стоимости основного и вспомогательного технологического оборудования, а также специальных материалов [174] (приложение Г). Кроме того, учитывалось то, что расчет капитальных вложений в специальный инструмент и оснастку производится по пунктам, стоимость которых превышает 30 минимальных зарплат и сроком службы более года [179]. Расходный инструмент и техоснастку принято считать быстроизнашивающимися предметами, ввиду данного условия их стоимость учитывалась в расходах на содержание и эксплуатацию оборудования.

В рамках определения себестоимости восстановленного шнека (гото-

вой единицы продукта) производился расчет по количеству затрачиваемых материалов на его обработку (порошок ПР-НХ17СР4 и порошок TiC). Исходя из площади восстанавливаемых поверхностей шнека (винтовой и цилиндрической), толщины покрытия и плотности композитного материала были посчитаны затраты на материал для напыления (приложение Г). Также были посчитаны затраты на песок, который использовался при пескоструйной обработке поверхностей шнека (приложение Г). Помимо затрат на материалы учитывались затраты на технологические направления, такие как топливо (газы) и электроэнергия.

К затратам на топливо относятся затраты на транспортирующий и плазмообразующий газ:

$$C_{ГАЗ} = (1534 \cdot 29/60) \cdot 9,7 \cdot 1,5 = 10787,855 \text{ у.е.}$$

Затраты на электроэнергию $C_Э$ (у.е.) рассчитывались

$$C_Э = \frac{(M \cdot T \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3)}{\eta} \times Ц_Э, \quad (5.1)$$

где M – суммарная мощность электродвигателей на участке напыления (100 кВт); T – действительный годовой фонд работы оборудования (1976 час); K_1 – комплексный коэффициент, учитывающий использование электродвигателя по мощности и по времени (0,7); K_2 – коэффициент загрузки оборудования (0,8); K_3 – коэффициент, учитывающий потери в сети (1,05); $Ц_Э$ – стоимость 1 кВт/час электроэнергии (0,0210 у.е.); η – КПД электродвигателей (0,8).

$$C_Э = ((100 \cdot 1976 \cdot 0,7 \cdot 0,8 \cdot 1,05) / 0,8) \cdot 0,0210 = 3049,956 \text{ у.е.}$$

Отдельным пунктом рассчитывался фонд заработной платы всех категорий рабочих. Результаты расчетов фонда оплаты труда представлены в приложении Г. При этом также был посчитан единый социальный налог (ЕСН), который составляет 30,2 % от фонда заработной платы (ФЗП) [179].

Также производился расчет общепроизводственных, общехозяйственных и коммерческих расходов. Были определены затраты на силовую энергию и стоимости потребляемой энергии. Текущий ремонт оборудования

и транспортных средств определялся в размере 5-7 % (ценных инструментов 10-20 %) от их балансовой стоимости. Расходы на внутризаводское перемещение грузов (на содержание и эксплуатацию транспортных средств, и горючие материалы) определялись в размере 40 % от стоимости транспорта. При определении общепроизводственных расходов учитывались: амортизация зданий, сооружений и инвентаря, расходы на их содержание и ремонт, расходы на инновационную деятельность, расходы по охране труда, износ малоценного и быстро изнашиваемого инвентаря (приложение Г). Общехозяйственные расходы учитывались в размере 70-80 % от основной заработной платы производственных рабочих (в том числе материальные затраты – 65 %, зарплата – 15 % и амортизация – 20 %) [37, 86, 174]. Коммерческие расходы составляют 3-5 % от производственной себестоимости [179].

Производился расчет технико-экономических показателей цеха (таблица 5.3). Так, определялся годовой объем выпуска восстановленных шнеков в условных отпускных ценах, прибыль от реализации восстановленных шнеков и чистая прибыль.

Таблица 5.3 – Техничко-экономические показатели участка по восстановлению шнеков плазменным напылением композитных покрытий

№ п/п	Показатели	Значения
1.	Годовой объем выпуска восстановленных шнеков а) в натуральном выражении, шт.;	1534
	б) в стоимостном выражении (условных отпускных ценах), млн. у.е.	3,067212
2.	Стоимость инвестиций – всего, млн. у.е.,	0,613600
2.1.	в том числе основных фондов, млн. у.е.	0,208600
3.	Численность работающих, чел.,	7
3.1.	в том числе производственных рабочих, чел.	3
4.	Фонд заработной платы, млн. у.е.	0,108972
5.	Среднемесячная зарплата 1 работающего, у.е.	1297,285
6.	Производительность труда 1 работающего, млн.	0,438173
7.	Фондоотдача	14,70379
8.	Фондовооруженность труда, млн. у.е.	0,069533
9.	Себестоимость годового объема, млн. у.е.	2,45377
10.	Увеличение себестоимости единицы продукции, млн. у.е.	0,0015995
11.	Прибыль чистая, млн. у.е.	0,487400
12.	Рентабельность производства, %	79,43
13.	Годовой экономический эффект, млн. у.е.	0,468992
14.	Период возврата инвестиций, лет	1,258

Годовой экономический эффект восстановления шнека плазменным напылением составил 468 992,4 у.е. Период возврата инвестиций составит 1,258 года.

5.4 Выводы по пятой главе

1. Разработана и внедрена технология плазменного напыления, прошедшая апробацию в лабораторных и экспериментальных условиях, позволяющая получать износостойкие композитные покрытия с необходимыми физико-механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками.

2. Годовой экономический эффект восстановления шнеков составил 468992,4 у.е. Период возврата инвестиций составил 1,258 года при программе восстановления 1534 шнека в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в работе теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать выводы:

1. Нанесение композитных покрытий плазменным напылением на изношенные поверхности детали с целью ее восстановления и увеличения ресурса эксплуатации представляет научный и практический интерес в области восстановления транспортной техники и специального оборудования АПК.

2. Разработана установка для нанесения композитных материалов на поверхности деталей плазменным напылением, обеспечивающая высокую точность перемещения плазмотрона относительно восстанавливаемой поверхности детали.

3. Получены аналитические зависимости кинематических режимов плазменного напыления от геометрических особенностей поверхностей шнека, толщины формируемого композитного покрытия и температуры нагрева рабочих поверхностей. Также получены аналитические зависимости определения величины смещения изотермы плавления относительно изотермы контакта. Разработаны программные продукты для автоматизации расчетов параметров плазменного напыления поверхностей деталей машин.

4. Теоретически обоснован и экспериментально доказан новый состав композитного материала: карбид титана фракцией 63-80 мкм – 23,5 %, порошок ПР-НХ17СР4 фракцией 40-64 мкм – 76,5 %, обеспечивающий высокую прочность сцепления покрытия с основой.

5. Определены технологические режимы плазменного напыления композитного покрытия 76,5 % ПР-НХ17СР4+23,5 % TiC для винтовой и цилиндрической поверхностей шнека при напряжении на дуге 260 В – сила тока дуги плазмотрона 233...248 А, дистанция напыления 81...83 мм, массовый расход напыляемого материала 0,4...0,5 г/с, скорость вращения детали 35...37 мин⁻¹ (для цилиндрической поверхности), подача 4...6 мм/об

(для цилиндрической поверхности), скорость перемещения плазмотрона 3...7 мм/мин (для винтовой поверхности), объемный расход плазмообразующего газа 0,8...1,8 л/с.

6. Экспериментальные исследования подтвердили корректность теоретических положений, разработанных в диссертационной работе. Получены регрессионные модели зависимости прочности сцепления покрытия с основой от размера и концентрации наполнителя композитного материала напыления. Также получены регрессионные модели зависимости прочности сцепления покрытия с основой и твердости покрытия от технологических режимов напыления рабочих поверхностей шнека.

7. Экспериментально установлено, что износостойкость полученного композитного покрытия в 2,52 раза превосходит упрочняющий слой легированного покрытия из порошка ПР-НХ17СР4 и в 3,39 раза поверхностный слой детали из стали 20Х без функционального покрытия.

Микротвердость композитного покрытия 76,5 % ПР-НХ17СР4+23,5 %TiС в 1,4 раза выше, чем микротвердость легированных покрытий ПР-НХ17СР4+TiС и в 1,7 раза выше, чем микротвердость стандартных покрытий ПР-НХ17СР4.

8. Разработаны технология и состав композитного материала для восстановления изношенных поверхностей шнека транспортирующего конвейера АПК. Технология и состав композитного материала внедрены в ООО «ИНОКС РЕМ» и ООО «Совтех». Годовой экономический эффект восстановления и упрочнения шнека составил 468992,4 у.е. Период возврата инвестиций составит 1,258 года при программе восстановления 1534 шнека в год.

9. Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанную технологию восстановления и состав композитного материала для восстановления изношенных поверхностей шнеков таких конвейеров, как У13-БКШ, БКВ, УКВ 1 L10, УКВ, СВТ, КВЦ300, У9-УКВ, которые весьма активно используются на предприятиях АПК.

10. Перспективными направлениями дальнейшей разработки темы являются: исследование особенностей распространения нестационарных волн при формировании композитных покрытий плазменным напылением, разработка технологии размерного нанесения покрытия при восстановлении контактируемых поверхностей высокоресурсных деталей АПК, а также изучение наполнителей композитных материалов с целью расширения спектра их возможного использования при восстановлении деталей машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ASTM C1624. Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point SCRATCH Testing.
2. ASTM D2197–16. Standard Test Method for Adhesion of Organic Coatings by Scrape Adhesion, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
3. Cai B. Tribological properties of TiC particles reinforced Ni-based alloy composite coatings / B. Cai, Y.-f. Tan, L. He, et al. // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2013. Vol. 13. – P. 1681–1688.
4. Golubina S.A. Development of methods for increasing the technical and economic efficiency of the application of hardening technologies for flat working bodies of tillage machines / S.A. Golubina, V.N. Sidorov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Sevastopol, 07-11 сентября 2020 года. Sevastopol, 2020. – P. 052054. – DOI 10.1088/1757-899X/971/5/052054.
5. ISO 19252:2008. Plastics — Determination of scratch properties. (<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:19252:ed-1:v1:en>).
6. ISO 20502. Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – Determination of adhesion of ceramic coatings by scratch testing (<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:20502:ed-1:v1:en>).
7. Lee R. Method for Calculation of Constructive and Mode Parameters of Infrared Heating Unit for Drying of Polymeric Coatings on a Metal Substrate / R.Lee, A.Melnikov, A. Pchelnikov, D.Psarev // Proceedings - 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019, Lipetsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 633–635. DOI 10.1109/SUMMA48161.2019.8947503.
8. Li Q. Microstructure and dry sliding wear behavior of laser clad Ni-based alloy coating with the addition of SiC / Q. Li, G.M. Song, Y.Z. Zhang, et al. // Wear. 2003. Vol. 254. Is. 3-4. – P. 222–229.
9. Sharifullin S.N. Calculation of parameters of particles in a plasma jet and

modeling of kinematic models of spraying of wear resistant material / S.N. Sharifullin, G.I. Trifonov, , I.N. Vyachina // Journal of Physics: Conf. Series. 2018. T. 1058. (012047). DOI: 10.1088/1742.

10. Trifonov G.I. Combined Additive Technology in the Restoration of Aircraft Parts / G.I. Trifonov, N.A. Penkov, A.A. Krasnov, V.G. Gritsyuk // International Theoretical and Practical Conference on Alternative and Smart Energy (TPCASE 2018), ISBN: 978-1-60595-617-6, 2018. – P. 294–297.

11. Trifonov G.I. Estimation of a Heat Distribution in a Part Plasma Coating Process / G.I. Trifonov, S.Yu. Zhachkin, M.N. Krasnova, N.A. Penkov // International Theoretical and Practical Conference on Alternative and Smart Energy (TPCASE 2018), ISBN: 978-1-60595-617-6, 2018. – P. 298–301.

12. Wang X.H. Microstructure and wear properties of TiC/FeCrBSi surface composite coating prepared by laser cladding / X.H. Wang, M. Zhang, X.M. Liu, et al. // Surface and Coatings Technology. 2008. Vol. 202. – P. 3600–3606.

13. Zhachkin S.Yu. Investigation and prediction of adhesion strength of plasma coatings by mathematical modeling of deposition parameters / S.Yu. Zhachkin G.I. Trifonov, N.A. Penkov // ICMTMTE. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709 (2020) 022017. DOI:10.1088/1757-899X/709/2/0220172.

14. Адигамов К.А. Сравнительный анализ производительности и удельных энергозатрат шнековых конвейеров с неподвижным и вращающимся кожухом / К.А. Адигамов // Новые технологии. Образование и наука. – М.: МГУДТ, 2003. – С. 3–7.

15. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский // Издание второе, переработанное и дополненное. М.: Наука, 1976. – 279 с.

16. Акулич П.В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П.В. Акулич // Минск: Беларус. навука, 2010. – 443 с.

17. Андриевский Р.А. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе / Р.А. Андриевский, И.И. Спивак // Челябинск: Metallurgia. 1989. – 367 с.

18. Афанасьев Е.А. Упрочнение и восстановление деталей машин электроосажденными композиционными покрытиями на основе железа с применением дисульфида молибдена: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.А. Афанасьев. Курск, 2015. – 17 с.

19. Байбара С.Н. Вертикальный шнековый конвейер / С.Н. Байбара, К.А. Адигамов // Межвуз. сб. науч. тр. «Проблемы машиностроения и технического обслуживания в сфере сервиса. Радиоэлектроника, телекоммуникации и информационные технологии», 2005. – С. 3–4.

20. Байбара С.Н. Обоснование параметров однозаходного вертикального шнекового конвейера с двухлопастной загрузкой: диссер. ... канд. техн. наук / С.Н. Байбара // Шахты, 2008. – 142 с.

21. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Перевод с английского. М.: Машиностроение, 1986. – 360 с.

22. Бакуменко А.В. Некоторые аспекты комбинированных методов обработки стальных деталей / А.В. Бакуменко, Г.И. Трифионов, Ю.С. Ткаченко // Высокие технологии в машиностроении: материалы Всероссийской научно–технической интернет–конференции. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», 2016. – С. 9–11.

23. Балановский А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. – Иркутск. Изд-во ИрГТУ, 2006. – 180 с.

24. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий / В.А. Барвинок // М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.

25. Батаев А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: Учебник / А.А. Батаев, В.А. Батаев // Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с.

26. Белинин Д.С. Совершенствование технологии плазменной поверхностной обработки тяжело нагруженных изделий из высоколегированных сталей: диссер. ... канд. техн. наук / Д.С. Белинин // Пермь, 2014. – 133 с.

27. Белов В.К. Определение адгезионных характеристик покрытий

с применением современного скретч-теста. Часть 2. Примеры решения технологических задач скретч-тестом приложения / В.К. Белов, Е.В. Губарев, О.В. Кривко, А.В. Папшев, Н.Г. Гофман, Е.Г. Самородова // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Вып. № 76 (3). – С. 242–250. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-3-242-250>.

28. Боровский Г.В. Современные технологии обработки металлов / Г.В. Боровский, С.Н. Григорьев, А.Р. Маслов // М.: Машиностроение, 2015. – 304 с.

29. Боровушкин И.В. Плазменная обработка материалов: методическое руководство к лабораторным и практическим занятиям по дисциплине «Технология конструкционных материалов и материаловедение» для студентов специальностей 170400, 150200, 230100, 311300, 311400 всех форм обучения: самост. учеб. электрон. изд. Сыктывкар: СЛИ, 2010. Режим доступа: <http://lib.sfi.komi.com>.

30. Буркин С.П. Остаточные напряжения в металлопродукции: учебное пособие / С.П. Буркин, Г.В. Шимов, Е.А. Андрюкова // Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 248 с.

31. Ваганов-Вилькинс А.А. Композиционные политетрафторэтиленоксидные покрытия, сформированные методом плазменно-электролитического оксидирования на алюминии и титане: диссер. ... канд. хим. наук / А.А. Ваганов-Вилькинс // Владивосток, 2015. – 144 с.

32. Васильев Л.Л. Теплофизические свойства пористых материалов / Л.Л. Васильев, С.А. Танаева // Минск: Наука и техника, 1971. – 265 с.

33. Верхорубов В.С. Влияние плазменного оплавления на износостойкость металлизационных покрытий системы Fe-C-Cr-Ti-Al: диссер. ... канд. техн. наук / В.С. Верхорубов // Екатеринбург, 2015. – 122 с.

34. Воронкова М.Н. Упрочнение и восстановление деталей оборудования промышленности строительных материалов плазменным напылением: диссер. ... канд. техн. наук / М.Н. Воронкова // Белгород, 2005. – 137 с.

35. Гаршин А.П. Керамический композиционный материал на основе

карбида кремния и корунда с корундовой матрицей / А.П. Гаршин, В.М. Шумячер, О.И. Пушкарёв // Научные исследования и разработки. Новые огнеупоры. Вып. № 1. 2014. – С. 31–34.

36. Гевко Б.М. Технология изготовления спиралей шнеков / Б.М. Гевко // Львов: Вицашк. Изд-во при Львов, ун-те, 1986. – 128 с.

37. Головачёв А.С. Экономика предприятия: учебное пособие / А.С. Головачёв // Минск: РИВШ, 2018. – 395 с.

38. Голубина С. А. Разработка методики определения зон преимущественного упрочнения отвалов плугов / С.А. Голубина // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ. Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2017. – С. 135–140.

39. Голубина С. А. Теоретические предпосылки повышения производительности дуговой наплавки при импульсной подаче присадочной проволоки / С.А. Голубина // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы международной научно-практической конференции. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2018. – С. 330–336.

40. ГОСТ 1778-70. Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений. – М.: Издательство стандартов, 2011. – 31 с.

41. ГОСТ 23.208-79. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 4 с.

42. ГОСТ 31335-2006. Оборудование технологическое для литейного производства. Оборудование для дробеметной, дробеструйной и дробеметно-дробеструйной обработки. – М.: Стандартинформ, 2007. – 11 с.

43. ГОСТ 3647-80. Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля. – М.: Издательство стандартов, 2004. – 19 с.

44. ГОСТ 9013-59 (ИСО 6508-86). Металлы. Метод измерения твердо-

сти по Роквеллу. – М.: Издательство стандартов, 2002. – 10 с.

45. ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78) Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – М.: Издательство стандартов, 1993. – 35 с.

46. Грачев Ю.П. Математические методы планирования экспериментов / Ю.П. Грачев, Ю.М. Плаксин // Учебное пособие. Москва: ДеЛи принт, 2005. – 296 с.

47. Григорьев А.М. Винтовые конвейеры / А.М. Григорьев // М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.

48. Гришина И.П. Совершенствование технологии и оборудования для напыления порошковых покрытий в производстве изделий машиностроения и электровакуумных приборов на основе концентрации плазменных процессов в одной рабочей установке: автореф. диссер. ... канд. техн. наук / И.П. Гришина // Саратов, 2014. – 20 с.

49. Дегтярев А.С. Формирование структуры и абразивный износ Fe-Cr-V-Mo-C покрытий, полученных плазменно-порошковой наплавкой: диссер. ... канд. техн. наук / А.С. Дегтярев // Томск, 2018. – 212 с.

50. Дульнев Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк // Л.: Энергия, 1974. – 264 с.

51. Евстратов В.А. Шнековые пресса и винтовые конвейеры в промышленности строительных материалов / В.А. Евстратов, Н.Н. Евстратова // Издательство СКНЦ ВШ, 2001. – 206 с.

52. Ельцов В.В. Разработка схемы технологического процесса для восстановления деталей машин сваркой: учеб. – метод. пособие / В.В. Ельцов // Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. – 95 с.

53. Ельцов В.В. Ремонтная сварка и наплавка деталей машин и механизмов: учебное пособие / Ельцов В.В // Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. – 176 с.

54. Ерохин М.Н. Проектирование и расчет подъемно-транспортных машин сельскохозяйственного назначения / М.Н. Ерохин, А.В. Карп, Н.А. Выскребенцев и др. // М.: Колос, 1999. – 228 с.

55. Жачкин С.Ю. Анализ износостойкости функционального покрытия

в условиях абразивного изнашивания сложнопрофильной детали трения / С.Ю. Жачкин, Е.В. Пухов, Г.И. Трифонов, Я.В. Комаров, К.В. Загоруйко // Вестник воронежского государственного аграрного университета. Процессы и машины агроинженерных систем. Вып. № 3 (62). Т. 12, 2019. – С. 32–40.

56. Жачкин С.Ю. Влияние кинематики движения инструмента на формирование износостойкого покрытия / С.Ю. Жачкин, М.Н. Краснова, Н.А. Пеньков, Г.И. Трифонов // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 14. № 5, 2018. С. – 142–147.

57. Жачкин С.Ю. К вопросу о математическом моделировании процесса плазменного напыления при восстановлении деталей АПК / С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов, Н.А. Пеньков, А.В. Бирюков // Журнал «Упрочняющие технологии и покрытия». № 4 (196), 2021. – С.162–165.

58. Жачкин С.Ю. Математическая оценка процесса транспортирования абразивного материала шнековым конвейером / С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов // Новые технологии и технические средства для эффективного развития АПК: материалы национ. научно-практической конф., ВГАУ имени императора Петра I. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2019. – С. 188–193.

59. Жачкин С.Ю. Математическое моделирование и анализ факторов, влияющих на качество плазменных покрытий деталей машин / С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов, А.С. Богачёв // Авиapersпектива: региональный сб. науч. тр. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Вып. № 1, 2017. С. – 181–192.

60. Жачкин С.Ю. Моделирование кинематики плазменного напыления на сложнопрофильные поверхности / С.Ю. Жачкин, М.Н. Краснова, Н.А. Пеньков, Г.И. Трифонов // Труды ГОСНИТИ. Т. 128, 2017. – С. 133–139.

61. Жачкин С.Ю. Моделирование процесса осаждения композитных покрытий на основе хрома / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, Г.И. Трифонов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн. Материалы IV Международной научно-практической конференции: в 3 т. под общ. ред. В.А. Немтинова; ФГБОУ ВО «ТГТУ». Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО

«ТГТУ», Вып. № 4, 2017. – С. 59–63.

62. Жачкин С.Ю. Оценка физико-механических параметров покрытий плазменного напыления после восстановления детали трения авиационной промышленности / С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. Вып.№ 11, 2019. – С. 77–84.

63. Жачкин С.Ю. Повышение надежности контактных поверхностей подъемного механизма путем комбинированной плазменной обработки / С.Ю. Жачкин, М.Н. Краснова, Н.А. Пеньков Г.И. Трифонов // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. № 1, 2017. – С. 140–145.

64. Жачкин С.Ю. Применение технологии плазменного напыления для повышения эксплуатационной надежности сельхозмашин / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, Г.И. Трифонов // Журнал «Наука в Центральной России» ФГБНУ ВНИИТИН. № 4 (28), 2017. – С. 131–136.

65. Жачкин С.Ю. Прогнозирование износостойкости плазменного покрытия при абразивном изнашивании / С.Ю. Жачкин, Д.Б. Слинко, Г.И. Трифонов // Труды ГОСНИТИ. Т. 132, 2018. – С. 225–231.

66. Жачкин С.Ю. Прогнозирование толщины плазменного покрытия при восстановлении сложнопрофильных поверхностей / С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов, Н.А. Пеньков // Энергоэффективность и энергоснабжение в современном производстве и обществе: материалы международной научно-практической конференции. Ч II. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», 2018. – С. 70–78.

67. Жачкин С.Ю. Стендовая установка для оценки абразивного износа деталей авиационных узлов и механизмов / С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов // Авиакосмические технологии (АКТ-2018): Труды XIX Международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. Воронеж: ООО Фирма «Элист»; 2018. – С. 333–339.

68. Жачкин С.Ю. Холодное гальваноконтактное восстановление деталей / С.Ю. Жачкин // Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2002. – 138 с.

69. Жданов С.К. Основы физических процессов в плазме и плазменных

установках / С.К. Жданов, В.А. Курнаев, М.К. Романовский, И.В. Цветок // М.: МИФИ, 2000. – 184 с.

70. Живогин А.А. Восстановление гильз цилиндров дизельных двигателей сельскохозяйственной техники гальваническим композитным покрытием на основе железа: диссер. ... канд. техн. наук / А.А. Живогин // Воронеж, 2014. – 174 с.

71. Жидков И.С. Электрофизические методы обработки материалов: учебное пособие / И.С. Жидков, А.И. Кухаренко, С.О. Чолах // Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 195 с.

72. Зверев Е.А. Оценка уровня остаточных напряжений в плазменных покрытиях / Е.А. Зверев, В.Ю. Скиба, Н.В. Вахрушев, А.К. Гаврилов // Международный научно-исследовательский журнал, 2017. Вып. № 5 (59). – С. 42–47.

73. Зиновьева Т.Ю. Формирование плазменных покрытий при активации поверхности электрической дугой пульсирующей мощности: диссер. ... канд. техн. наук / Т.Ю. Зиновьева // Самара, 1999. – 155 с.

74. Зотов Б.Н. Расчет характеристик шнеков постоянного и переменного шага / Б.Н. Зотов // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. МГТУ им. Н.Э. Баумана. № 3, 2015. – С. 29–40.

75. Иванников В.А. Разработка процесса плазменного напыления покрытий на внутренние поверхности деталей машин: диссер. ... канд. техн. наук / В.А. Иванников // Воронеж, 2000. – 157 с.

76. Ильин В.А. Линейная алгебра / В.А. Ильин, Э.Г. Позняк // М.: Наука. Физмалит, 1999. – 296 с.

77. Ильющенко А.Ф. Восстановление-упрочнение деталей машин газоплазменным напылением многокомпонентных покрытий / А.Ф. Ильющенко, Е.Д. Манойло, Э.Н. Толстяк // Тяжелое машиностроение. № 2, 1999. – С. 6–8.

78. Ильющенко А.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.А. Оковитый, Г.Ф. Громыко // Минск: Беларус. навука, 2011. – 357 с.

79. Ильяшенко Д.П. Оборудование для полуавтоматической сварки /

Д.П. Ильященко // Сварочное производство. № 7, 2006. – С. 18–30.

80. Кадырметов А.М. Исследование процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий и пути управления их качеством / А.М. Кадырметов // Научный журнал КубГАУ, № 81 (07), 2012. – С. 1–18.

81. Казакова В.А. Безопасный ремонт с.-х. машин на предприятиях АПК / В.А. Казакова, Е.М. Филиппова, И.Б. Ивлева, А.А. Данков, Л.А. Буренко // Труды ГОСНИТИ. Т. 128, 2017. – С. 92–97.

82. Калита В.И. Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой: монография / Калита В.И., Комлев Д.И. // М.: Лидер М, 2008. – 388 с.

83. Катанов Б.А. Влияние геометрических погрешностей на транспортирующую погрешность шнека / Б.А. Катанов, В.И. Кузнецов // Изв. вузов. Горный журнал. № 11, 1972. – С. 22–34.

84. Кипарисов С.С. Карбид титана: получение, свойства, применение / С.С. Кипарисов, Ю.В. Левинский, А.П. Петров // Производственное издание М.: Металлургия, 1987. – 216 с.

85. Кириллов В.Н., Дубинкер Ю.Б. и др. Теплопроводность систем «Кремнийорганический эластомер – порошкообразный минеральный наполнитель». ИФЖ. Т. XXIII. № 3, 1972. – 11 с.

86. Клочкова Е.Н. Экономика предприятия / Е.Н. Клочкова, В.И. Кузнецов, Т.Е. Кузнецов // М.: Юрайт, 2014. – 448 с.

87. Ковалев А.С. Повышение работоспособности гидрооборудования лесозаготовительных машин / А.С. Ковалев, Г.А. Пилюшина // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2018. № 52. URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-rabotosposobnosti-gidrooborudovaniya-lesozagotovitelnyh-mashin> (дата обращения: 03.11.2021).

88. Конвейер винтовой передвижной У10-КПВ, У10-КПШ [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://semm.ru/%D0%A310-%D0%9A%D0%9F%D0%92>.

89. Конвейер винтовой передвижной У10-СПШ-80, У10-ЗПШ-80

[Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://semm.ru/%D0%A310-%D0%A1%D0%9F%D0%A8-80>.

90. Конвейер винтовой У10-КШ-25, У10-КВ-100, У10-БХ-50 (в трубе), У10-БХ-50-Н (наклонный) [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://semm.ru/%D0%A310-%D0%9A%D0%A8-25>.

91. Конвейеры: Справочник / под ред. Пертена Ю.А. // М: Машиностроение, 1984. – 367 с.

92. Кондратьев М.В. Технология комбинированного эрозионно-лучевого плазменного нанесения износостойких покрытий: диссер. ... канд. техн. наук / М.В. Кондратьев // Воронеж, 2017. – 167 с.

93. Концепция модернизации инженерно-технической системы сельского хозяйства России на период до 2020 года. Проект. Москва, 2010. – 46 с.

94. Косачев В.Б. Коррозия металлов / В.Б. Косачев, А.П. Гулидов // Новости теплоснабжения. № 1 (17), 2002. – С. 34–39.

95. Кравченко И.Н. Исследования прочности плазменных покрытий повышенной толщины путем регулирования внутренних напряжений / И.Н. Кравченко, М.А. Глинский, А.А. Коломейченко, А.А. Пузряков, Ю.А. Шамарин // Вестник «Технический сервис в АПК». Вып. № 5. 2017. – С. 40–48.

96. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов // М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

97. Крагельский И.В. Трение и износ. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.

98. Кривобоков В.П. Плазменные покрытия (свойства и применение): учебное пособие / В.П. Кривобоков, Н.С. Сочугов, А.А. Соловьев // Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 136 с.

99. Крюковская Н.С. Современные методы упрочнения органов почвообрабатывающих орудий. / Н.С. Крюковская // Труды ГОСНИТИ. Т. 128, 2017. – С.118–123.

100. Кудинов В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. / В.В. Кудинов // М.: Машиностроение, 1993. – 488 с.

101. Кузьмин В.И. Повышение эффективности плазменного напыления порошковых покрытий / В.И. Кузьмин, Е.В. Картаев, С.П. Ващенко, Д.В. Сергачёв, Е.Е. Корниенко // Вестник Югорского государственного университета. Вып. № 2 (33), 2014. – С. 7–14.

102. Курбатов Ю.Л. Теплотехника металлургического производства: Учебное пособие / Ю.Л. Курбатов, В.В. Кравцов, Н.С. Масс, Ю.Е. Василенко // Донецк: Издательство «Ноулидж» (донецкое отделение), 2011. – 217 с.

103. Леонов С.Л. Моделирование износа наплавленных поверхностей деталей / С.Л. Леонов, А.А. Ситников, М.Е. Татаркин // Ползуновский альманах. № 1, 2012. – С.228–229.

104. Лещинский Л.К. Плазменное поверхностное упрочнение / Л.К. Лещинский, С.С. Самогугин, И.И. Пирч, В.И. Комар // К.: Тэхника, 1990. – 109 с.

105. Ли Р.И. Перспективный композиционный материал для восстановления корпусных деталей автотракторной техники / Р.И. Ли, Д.Н. Псарев, А.В. Мироненко, М.Р. Киба // Научная мысль. 2017. № 3. – С. 186–188.

106. Ли Р.И. Теплофизические свойства эластомерных нанокмозитов для восстановления изношенных корпусных деталей автомобилей / Р.И. Ли, Ю.Н. Ризаева, Д.Н. Псарев, М.Р. Киба // Современные проблемы материаловедения: Сборник научных трудов II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 65-летию ЛГТУ, Липецк, 18 февраля 2021 года. Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2021. – С. 20–24.

107. Ли Р.И. Технологии восстановления и упрочнения деталей автотракторной техники: учеб. пособие / Р.И. Ли // Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2014. – 379 с.

108. Литвинова Т.А. Металлографические исследования структуры защитных покрытий, выполненных методом газопорошковой наплавки / Т.А. Литвинова, Д.В. Могилевский, Н.Н. Подрезов, С.Н. Егоров, Р.В. Пирожков // Инженерный вестник Дона, №3. 2014. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2454.

109. Лобанов Н.И. Защитные покрытия: учеб. пособие / М.Л. Лобанов, Н. И. Кардолина, Н.Г. Россина, А.С. Юровских // Екатеринбург: Изд-во Урал.

ун-та, 2014. – 200 с.

110. Ловшенко Ф.Г. Композиционные наноструктурные механически легированные порошки для газотермических покрытий: монография / Ф.Г. Ловшенко, Г.Ф. Ловшенко // Могилев: Беларус. -Рос. ун-т, 2013. – 215 с.

111. Ловшенко Ф.Г. Повышение качества плазменных металлокерамических покрытий / Ф.Г. Ловшенко, Г.Ф. Ловшенко, А.С. Федосенко, А.М. Старовойтов // Вест. Беларус.-Рос. ун-та. № 3, 2011. – С. 71–81.

112. Логинов П.К. Способы и технологические процессы восстановления изношенных деталей / П.К. Логинов, О.Ю. Ретюнский // Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 217 с.

113. Лопата Л.А. Создание износостойких композиционных покрытий на основе порошков самофлюсующихся сплавов электроконтактным припеканием / Л.А. Лопата, В.Я. Николайчук, В.Н. Барановский, С.Л. Чиграй // Проблемы трибологии (Problems of Tribology) № 4, 2015. – С. 92–98.

114. Лоскутов С.В. Модель контакта частицы газотермического покрытия с шероховатой поверхностью подложки / С.В. Лоскутов, А.В. Ершов, О.А. Зеленина // Молодой ученый, № 2 (17), 2015. – С. 8–11.

115. Лоскутов С.В. Оценка контактной температуры при сцеплении частицы плазменного покрытия с шероховатой поверхностью подложки / С.В. Лоскутов, А.В. Ершов, Е.А. Зеленина // Вісник двигунобудування. № 1, 2016. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-kontaktnoy-temperatury-pri-stseplenii-chastitsy-plazmennogo-pokrytiya-s-sherohovatoy-poverhnostyu-podlozhki> (дата обращения: 03.11.2021).

116. Медведев А.Ю. Расчет температурных полей при сварке и наплавке: учебное электронное издание / А.Ю. Медведев // ГОУ ВПО УГАТУ. Уфа: УГАТУ, 2009. – 144 с.

117. Менушенков А.П. Физические основы лазерной технологии / А.А. Менушенков, В.Н. Неволин, В.Н. Петровский // М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 212 с.

118. Милкова О.И. Экономика и организация предприятия: учебник и практикум для академического бакалавриата / О.И. Милкова // М.: Издатель-

ство Юрайт, 2017. – 473 с.

119. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций / А. Миснар // М.: Мир, 1968. – 464 с.

120. Михеев В.А. Исследование теплопроводности композиционных материалов на основе силикона с наполнителями / В.А. Михеев, В.Ш. Сулаберидзе, В.Д. Мушенко // Изв. ВУЗов. Приборостроение. Исследование теплопроводности композиционных материалов. Т. 58. № 7, 2015. – С. 571–575.

121. Молодык Н.В. Восстановление деталей машин / Н.В. Молодык, А.В. Зенкин // Москва: Машиностроение, 1989. – 480 с.

122. Мосейко Е.С. Исследование плазменных покрытий с ультразвуковой обработкой для повышения эксплуатационных свойств гребных валов: диссер. ... канд. техн. наук / Е.С. Мосейко // Санкт-Петербург, 2016. – 171 с.

123. Москвин А.А. Восстановление шнека экструдера: магистр. диссер. / А.А. Москвин // Тольятти, 2018. – 75 с.

124. Негода Е.Н. Тепловые процессы при сварке: учеб. пособие / Е.Н. Негода // Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2008. – 125 с.

125. Новые материалы. Коллектив авторов. Под научной редакцией Ю.С. Карабасова. М.: «МИСИС», 2002. – 736 с.

126. Овчинникова Т.В. Обоснование параметров и режимов работы пневмо-винтовой установки для транспортирования зерна с устройством для удаления легких примесей: диссер. ... канд. техн. наук / Т.В. Овчинникова // Саратов, 2016. – 137 с.

127. Овчинникова Т.В. Результаты экспериментальных исследований влияния шага шнека и скорости воздушного потока на производительность и суммарную мощность привода пневмовинтовой установки // Т.В. Овчинникова, П.И. Павлов // Научное обозрение. № 8, 2015. – С. 10–23.

128. Пантелеенко Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них / Ф.И. Пантелеенко // М.: УП «Технопринт», 2001. – 300 с.

129. Патент 2702994 (РФ) Машина для испытания деталей на абразив-

ный износ / С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов, Н.А. Пеньков // Заявка 2018140144/28 (066733) от 14.11.2018 г. Оpub. 15.10.2019 г. Бюл. № 29.

130. Патент 2762082 (РФ) Установка для нанесения композитных материалов на поверхности деталей различной конфигурации / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков // Заявка 2020141243 от 14.12.2020 г. Оpub. 15.12.2021 г. Бюл. № 35.

131. Пехович А.И. Расчеты теплового режима твердых тел / А.И. Пехович, В.М. Жидких // Л.: Энергия, 1976. – 352 с.

132. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления / А.Ф. Пузряков // Учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозитов». 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2008. – 360 с.

133. Радченко М.В. Разработка технологических рекомендаций по созданию защитных покрытий на трубах котлов с «кипящим слоем» газопорошковой наплавкой / М.В. Радченко, Ю.О. Шевцов, В.Г. Радченко, С.Г. Уварова // ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК. № 4, 2009. – С. 200–206.

134. Русинов Д.Ю. Анализ упрочняющих покрытий для защиты деталей гидрокоструйного перфоратора / Д.Ю. Русинов, Е.П. Рябоконт // Журнал Master's Journal. Вып. № 1, 2016. – С.147–152.

135. Савинкин В.В. Повышение долговечности восстановленных деталей элементов гидропривода строительно-дорожных машин: диссер. ... канд. техн. наук / В.В. Савинкин // Петропавловск, 2009. – 227 с.

136. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2017663563. Расчет кинематических режимов и параметров плазменного напыления / С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов // М.: РосПатент; заявитель и правообладатель: Трифонов Григорий Игоревич. Заявка № 2017618902; заявлено 29.08.2017; дата регистрации 07.12.2017 г.

137. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018663842. Программа по расчету параметров плазменного напыления для винтовой поверхности детали / С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов, С.В. Лаза-

рев // М.: РосПатент; заявитель и правообладатель: Трифонов Григорий Игоревич. Заявка № 2018661447; заявлено 17.10.2018; дата регистрации 06.11.2018 г.

138. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020663369. Моделирование скоростей распространения упругих волн при плазменном напылении функциональных покрытий / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин, А.В. Михальченко // М.: РосПатент; заявитель и правообладатель: Трифонов Григорий Игоревич. Заявка № 2020660744; заявлено 21.09.2020; дата регистрации 27.10.2020 г.

139. Слюдеев К.А. Расчет скорости и температуры порошка диоксида циркония, движущегося в плазменной воздушной струе / К.А. Слюдеев, А.А. Ляпин // Электронный журнал «Молодежный научно-технический вестник». Издатель ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана». Эл. № ФС77-51038.

140. Солоненко О.П. Компьютерное проектирование газотермических покрытий из порошков металлов / О.П. Солоненко, В.А. Бледнов, В.И. Иордан // Теплофизика и аэромеханика, Т. 18. № 2, 2011. – С. 265–283.

141. Соснин Н.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров / Н.Е. Соснин, С.А. Ермаков, П.А. Тополянский // СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 406 с.

142. Соснин Н.А. Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение / Н.А. Соснин, С.А. Ермаков, П.А. Тополянский // М.: Машиностроение, 2008. – 406 с.

143. Справочник экономиста предприятия / А.А. Говорин и др. // Москва: Инфра-М, 2018. – 422 с.

144. Степанова Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие / Т.Ю. Степанова // Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново, 2009. – 64 с.

145. Тарасова Т.В. Особенности формирования структуры наплавленных слоев при лазерной обработке / Т.В. Тарасова, В.С. Голубев, С.Д. Кузьмин // Упрочняющие технологии и покрытия. М.: Машиностроение, № 9

(117), 2014. – С. 26–31.

146. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию / М.М. Тененбаум // М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.

147. Тимохова О.М. Восстановление клапанов двигателей внутреннего сгорания плазменной наплавкой и напыление с модуляцией параметров / О.М. Тимохова, А.М. Кадырметов, Е.В. Снятков, В.В. Романов // Воронежский научно-технический вестник № 1 (23), 2018. – С. 53–67.

148. Тимохова О.М. Методика повышения коррозионной стойкости деталей лесных машин путем поверхностного упрочнения / О.М. Тимохова, О.Н. Бурмистрова // Системы. Методы. Технологии. № 3 (31), 2016. – С. 167–172.

149. Ткаченко Ю.С. О возможности использования технологических лазеров для решения задач упрочнения и повышения качества поверхности стальных деталей / Ю.С. Ткаченко, А.В. Бакуменко, Г.И. Трифонов // 56 Научно-техническая конференция ВГТУ. Секция «Автоматизированное оборудование»: материалы регион. науч.-техн. конф. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016. – С. 75–78.

150. Трифонов Г.И. Абразивный износ и факторы, определяющие износостойкость рабочих поверхностей шнеков транспортирующих конвейеров / Г.И. Трифонов // Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума «наука и инновации- современные концепции». Отв. ред. Д.Р. Хисматуллин. Москва: Издательство Инфинити, 2019. – С. 121–125.

151. Трифонов Г.И. Влияние кинематических режимов плазменного напыления на температуру нагрева детали / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин // Авиакосмические технологии (АКТ-2018): Тезисы XIX Международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. Воронеж: ООО Фирма «Элист». 2018. – С. 163–165.

152. Трифонов Г.И. Математическое моделирование и расчет технологических параметров плазменного напыления порошка оксида алюминия / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин // Авиакосмические технологии (АКТ-2017): Труды XVIII Международной научно-технической конференции и школы

молодых ученых, аспирантов и студентов. Воронеж: ООО Фирма «Элист», 2017. – С. 319–325.

153. Трифонов Г.И. Моделирование движения распылителя установки для плазменного напыления / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин // Техника и технологии: пути инновационного развития: сборник научных трудов 7-й Международной научно- практической конференции. Изд-во ЗАО «Университетская книга». Курск, 2018. – С. 311–315.

154. Трифонов Г.И. Моделирование тепловых процессов в композиции «покрытие–основа» при плазменном напылении / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин // Приложение к журналу. Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, Т. 23. № 123, 2018. – С. 531–534.

155. Трифонов Г.И. Оценка износа сложнопрофильной детали после плазменного напыления / Г.И. Трифонов // «Современные материалы, техника и технологии». № 1 (22). 2019. – С. 51–56.

156. Трифонов Г.И. Оценка интенсивности абразивного износа плазменного покрытия / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин, С.Н. Шарифуллин // Журнал «Ремонт, восстановление, модернизация». № 10. 2018. – С. 41–43.

157. Трифонов Г.И. Переоборудование устаревших станочных комплексов под устройства оценки износа заготовок / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин // Взгляд молодых на проблемы региональной экономики – 2018: материалы Всероссийского открытого конкурса студентов вузов и молодых исследователей. Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018. – С. 186–192.

158. Трифонов Г.И. Повышение износостойкости деталей машин с помощью плазменного напыления / Г.И. Трифонов, А.В. Бирюков, С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2019. – С. 225–229.

159. Трифонов Г.И. Применение карбида титана в технологии плазмен-

ного напыления с целью получения износостойкого покрытия / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин, О.А. Сидоркин // Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 115 годовщине со дня рождения профессора Харитончика Ефима Мироновича. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – С. 177–183.

160. Трифонов Г.И. Проектирование технологического процесса плазменного напыления шнека / Г.И. Трифонов // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сборник научных статей 4-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием; Курск: Из-во ЗАО «Университетская книга», 2019. – С. 262–266.

161. Трифонов Г.И. Расчет кинематических режимов и параметров плазменного напыления / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2018. – С. 240–243.

162. Трифонов Г.И. Расчетные методы оценки абразивного износа плазменного покрытия винтовой поверхности детали / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин // Приложение к журналу. Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, Т. 23. № 122, 2018. – С. 294–298.

163. Трифонов Г.И. Толщина покрытия детали при плазменном напылении / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин // Научно-практический журнал «Современные материалы, техника и технологии». №1 (16), 2018. – С. 77-82.

164. Трифонов Г.И. Установка для нанесения композитных покрытий на сложнопрофильные поверхности деталей / Г.И. Трифонов, Н.А. Пеньков // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК: сборник научных статей XV международной научно-практической конференции. Ставрополь: АГРУС Ставропольского гос. аграрного ун-та, 2019. – С. 453–460.

165. Трифонов Г.И. Факторы, определяющие прочностные свойства плазменного напыления / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин // Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 115 годовщине со дня рождения профессора Харитончика Ефима Мироновича. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. –С. 186–191.

166. Тушинский Л.И. Методы исследования материалов: Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, А.О. Токарев, В.И. Сиднеев // М.: Мир, 2004. – 384 с.

167. Хасуй А. Техника напыления. Пер. с японского. М.: «Машиностроение», 1975. – 288 с.

168. Целых Е.П. Влияние режимов ионно-плазменного напыления на структуру и свойства износостойких покрытий на резиновой подложке: диссер. ... канд. техн. наук / Е.П. Целых // Омск, 2015. – 170 с.

169. Черненко Г.В. Обоснование параметров вертикального шнекового конвейера с оребренным кожухом для транспортирования сыпучих материалов: диссер. ... канд. техн. наук / Г.В. Черненко // Шахты, 2010. – 135 с.

170. Черноиванов В.И. Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы) / В.И. Черноиванов, И.Г. Голубев // М.: ФГНУ «Росинформротех», 2010. – 376 с.

171. Черноиванов В.И. Восстановление деталей сельскохозяйственных машин / В.И. Черноиванов, В.П. Андреев // М.: Колос, 1983. – 287 с.

172. Черноиванов В.И. Организация и технология восстановления деталей машин / В.И. Черноиванов В.И. // М.: Агропромиздат, 1989. – 334 с.

173. Чесноков А.Е. Влияние высокоэнергетических воздействий на микроструктуру СВС металлокерамических порошков и газотермических покрытий «карбид титана – нихром»: диссер. ... канд. техн. наук / А.Е. Чесноков // Новосибирск, 2016. – 136 с.

174. Чечевицына Л.Н. Экономика организации: учебное пособие / Л.Н. Чечевицына, Е.В. Хачадурова // Ростов-на-Дону: Феникс, 2015. – 382 с.

175. Чижов В.Н. К выбору компонентов смеси для элетроконтактного нанесения износостойких покрытий / В.Н. Чижов, А.В. Бодякин // М., 1991. – С. 14–15.

176. Чичинадзе А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др. // М.: Машиностроение, 2003. – С. 107–139.

177. Ширяева Л.С. Производство и применение карбида титана (оценка, тенденции, прогнозы) / Л.С. Ширяева, А.К. Гарбузова, Г.В. Галевский // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Вып. № 2 (195), 2014. – С. 100–108.

178. Шоль Н.Р. Применение современных материалов для изготовления и ремонта деталей машин / Н.Р. Шоль, В.Д. Люосев, Л.Я. Иконникова, В.Ю. Прохоров // Ухта: УГТУ, 2004. – 251 с.

179. Экономика и финансы предприятия / под ред. Т.С. Новашинной. М.: Синергия, 2014. – 344 с.

180. Язовских В.М. Математическое моделирование и инженерные методы расчета в сварке: в 2 ч. Ч2. Тепловые процессы при сварке и моделирование в пакете MathCad / В.М. Язовских // Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 119 с.

Приложение А

(акты внедрения и эксплуатационных испытаний)



«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор
ООО «ИНОКС РЕМ»



А.В. Богданов А.В. Богданов

«14» октября 2021г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

технологии восстановления изношенных поверхностей шнека
транспортирующего конвейера плазменным напылением
износостойкого композитного покрытия (карбид титана – 23,5 %;
порошок ПГ-СР4 – 76,5%)

Мы, нижеподписавшиеся представители ООО «ИНОКС РЕМ» главный инженер А.П. Черных, начальник ОТК А.А.Зачиняев, и представители Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет» доктор технических наук, профессор Жачкин С.Ю., соискатель Трифонов Г.И. составили настоящий акт о том, что технология восстановления изношенных поверхностей шнека транспортирующего конвейера плазменным напылением износостойкого композитного покрытия (карбид титана – 23,5 %; порошок ПГ-СР4 – 76,5%), разработанная в ФГБОУ ВО «ВГТУ» Жачкиным С.Ю. и Трифоновым Г.И. внедрена в производство на предприятии ООО «ИНОКС РЕМ».

Перечень внедренных работ по теме

№ п/п	Содержание работы	Достигнутая техническая эффективность
1.	Разработана и внедрена технологии восстановления изношенных поверхностей шнека транспортирующего конвейера плазменным напылением износостойкого композитного покрытия	Износостойкость композитного покрытия в 2,52 раза превосходит упрочняющий слой, получаемый при нанесении стандартных функциональных порошков, формируемых легированное покрытие.



2.	<p>Определены оптимальные технологические режимы напыления композитного материала, которые обеспечат гарантированное получение качественного износостойкого покрытия на рабочих поверхностях шнека</p>	<p>Технологические режимы плазменного напыления NiCrBSiFe+TiC композитного покрытия для винтовой и цилиндрической поверхностей шнека (сила тока дуги плазмотрона 233...248 А, дистанция напыления 81...83 мм, массовый расход напыляемого материала 0,4...0,5 г/с, скорость вращения детали 35...37 мин⁻¹).</p>
----	--	--

Представители ООО «ИНОКС РЕМ»

 А.П. Черных

 А.А. Зачиняев

Представители ФГБОУ ВО «ВГТУ»

проф.  С.Ю. Жачкин

соиск.  Г.И. Трифонов



«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ООО «Совтех»

С.Г.Тихомиров

« 8 » ноября 2021 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

технологии восстановления изношенных поверхностей шнека транспортирующего конвейера плазменным напылением износостойкого композитного покрытия (карбид титана – 23,5 %; порошок ПГ-СР4 – 76,5%)

Мы, нижеподписавшиеся представителе ООО «Совтех» главный технолог Щербаков В.Н, главный механик Волкович Н.С. и представители Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет» доктор технических наук, профессор Жачкин С.Ю., соискатель Трифонов Г.И. составили настоящий акт о том, что технология восстановления изношенных поверхностей шнека транспортирующего конвейера плазменным напылением износостойкого композитного покрытия (карбид титана – 23,5 %; порошок ПГ-СР4 – 76,5%), разработанная в ФГБОУ ВО «ВГТУ» Жачкиным С.Ю. и Трифоновым Г.И. внедрена в производство на предприятии ООО «Совтех»

Перечень внедренных работ по теме

№ п/п	Содержание работы	Достигнутая техническая эффективность
1.	Разработана и внедрена технологии восстановления изношенных поверхностей шнека транспортирующего конвейера плазменным напылением износостойкого композитного покрытия	Износостойкость композитного покрытия в 2,52 раза превосходит упрочняющий слой, получаемый при нанесении стандартных функциональных порошков, формируемых легированное покрытие.
2.	Определены оптимальные технологические режимы напыления композитного материала, которые обеспечат гарантированное получение качественного износостойкого покрытия на рабочих поверхностях шнека	Технологические режимы плазменного напыления NiCrBSiFe+TiC композитного покрытия для винтовой и цилиндрической поверхностей шнека (сила тока дуги плазмотрона 233...248 А, дистанция напыления 81...83 мм, массовый расход напыляемого материала 0,4...0,5 г/с, скорость вращения детали 35...37 мин ⁻¹).

Представители ООО «Совтех»

 В.Н.Щербаков

 Н.С.Волкович

Представители ФГБОУ ВО «ВГТУ»

проф.  С.Ю. Жачкин

соиск.  Г.И. Трифонов


 УТВЕРЖДАЮ»
 Директор ООО «Совтех»
 _____ С.Г.Тихомиров
 » ноября 2021г.

Акт

эксплуатационных испытаний восстановленного шнека, установленного на
транспортирующих конвейерах АПК

Мы, нижеподписавшиеся представители ООО «Совтех» главный технолог Щербаков В.Н., главный механик Волкович Н.С. и представители Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет» доктор технических наук, профессор Жачкин С.Ю., соискатель Трифонов Г.И. составили настоящий акт об эксплуатационных испытаниях восстановленных рабочих поверхностей шнеков плазменным напылением (сила тока дуги плазмотрона 233...248 А, дистанция напыления 81...83 мм, массовый расход напыляемого материала 0,4...0,5 г/с, скорость вращения детали 35...37 мин-1) композитного покрытия (карбид титана – 23,5 %; порошок ПГ-СР4 – 76,5%).

В ходе эксплуатационных испытаний методом скрэтч тестирования было выявлено, что наибольшая адгезия и когезия наблюдаются у покрытия ПГ-СР4+23,5%TiC, затем по мере их уменьшения следует ПГ-СР4+18%TiC, ПГ-СР4+30%TiC и ПГ-СР4, что сопровождалось увеличением акустической эмиссии при постоянной нагрузке. У покрытия ПГ-СР4+23,5%TiC трещины при нанесении и эксплуатации на всем протяжении испытаний не наблюдались.

Исследование микротвердости показало, что композиционные покрытия из ПГ-СР4+TiC в 1,4 раза выше, чем микротвердость легированных покрытий ПГ-СР4+TiC и в 1,7 раза выше, чем микротвердость стандартных покрытий ПГ-СР4. Скорость изменения микротвердости в зависимости от толщины покрытия выше у легированных покрытий ПГ-СР4+TiC в 1,64 раза, а у стандартных покрытий ПГ-СР4 в 1,87 раза. Это объясняется наличием твердых включений TiC в покрытии.

Все шнеки, восстановленные плазменным напылением композитного покрытия (карбид титана – 23,5 %; порошок ПГ-СР4 – 76,5%) прошли успешные натурные и стендовые испытания. В настоящее время находятся на промышленных испытаниях изделия. Рекламации отсутствуют.

Представители ООО «Совтех»

_____ В.Н.Щербаков
 _____ Н.С.Волкович

Представители ФГБОУ ВО «ВГТУ»

проф. _____ С.Ю. Жачкин
 соиск. _____ Г.И. Трифонов

Приложение Б

(справочное)

$$locmax(v) := \left\| \begin{array}{l} m \leftarrow locmin(-v) \\ \text{for } j \in 0 \dots rows(m) - 1 \\ \left\| \begin{array}{l} M_j \leftarrow \begin{bmatrix} (m_j)_0 \\ -(m_j)_1 \end{bmatrix} \end{array} \right\| \\ M \end{array} \right\|$$

Постановка задачи

$$I := 1 \quad l := 1 \quad m := 1$$

$$f1(I, l, m) := 302.082 + 0.086 \cdot I - 0.33 \cdot l - 96.2 \cdot m + 0.001 \cdot I \cdot l + 0.348 \cdot I \cdot m$$

$$G1(x) = \mathbf{Maximize}(f)$$

$$G1(x) = \mathbf{Minimize}(f)$$

$$f2(I, l, n) := 93.86 + 1.11 \cdot I - 0.28 \cdot l - 0.42 \cdot n$$

$$G2(x) = \mathbf{Maximize}(f)$$

$$G2(x) = \mathbf{Minimize}(f)$$

Постановка задачи в программном комплексе «MathCad»

Microsoft Excel 14.0 Отчет о результатах

Лист: [Подбор режимов плаз нап.xlsx]Лист1

Отчет создан: 06.11.2020 20:30:13

Результат: Решение найдено. Все ограничения и условия оптимальности выполнены.

Модуль поиска решения

Модуль: Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ

Время решения: 0,016 секунд

Число итераций: 3 Число подзадач: 0

Параметры поиска решения

Максимальное время Без пределов, Число итераций Без пределов, Precision 0,000001, Использовать автоматическое масштабирование

Сходимость 0,0001, Размер совокупности 100, Случайное начальное значение 0, Правые производные, Обязательные границы

Максимальное число подзадач Без пределов, Максимальное число целочисленных решений Без пределов, Целочисленное отклонение 1%, Считать неотрицательными

Ячейка целевой функции (Значение)

Ячейка	Имя	Исходное значение	Окончательное значение
\$C\$10	Сцп= I,мм	302,082	295

Ячейки переменных

Ячейка	Имя	Исходное значение	Окончательное значение	Целочисленное
\$B\$6	I,A	0	200	Продолжить
\$C\$6	I,мм	0	84,47692308	Продолжить
\$D\$6	m,r/c	0	0,5	Продолжить

Ограничения

Ячейка	Имя	Значение ячейки	Формула	Состояние	Допуск
\$C\$10	Сцп= I,мм	295	\$C\$10=295	Привязка	0
\$B\$6	I,A	200	\$B\$6<=\$I\$6	Без привязки	50
\$B\$6	I,A	200	\$B\$6>=\$I\$7	Привязка	0
\$C\$6	I,мм	84,47692308	\$C\$6<=\$I\$6	Без привязки	65,52307692
\$C\$6	I,мм	84,47692308	\$C\$6>=\$I\$7	Без привязки	34,47692308
\$D\$6	m,r/c	0,5	\$D\$6<=\$K\$6	Привязка	0
\$D\$6	m,r/c	0,5	\$D\$6>=\$K\$7	Без привязки	0,2

Отчет о результатах рационального подбора параметров нанесения композитных покрытий (а)

Microsoft Excel 14.0 Отчет о результатах

Лист: [Подбор режимов плаз нап.xlsx]Лист1

Отчет создан: 06.11.2020 20:39:36

Результат: Решение найдено. Все ограничения и условия оптимальности выполнены.

Модуль поиска решения

Модуль: Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ

Время решения: 0,031 секунд

Число итераций: 2 Число подзадач: 0

Параметры поиска решения

Максимальное время Без пределов, Число итераций Без пределов, Precision 0,000001, Использовать автоматическое масштабирование

Сходимость 0,0001, Размер совокупности 100, Случайное начальное значение 0, Правые производные, Обязательные границы

Максимальное число подзадач Без пределов, Максимальное число целочисленных решений Без пределов, Целочисленное отклонение 1%, Считать неотрицательными

Ячейка целевой функции (Значение)

Ячейка	Имя	Исходное значение	Окончательное значение
\$C\$10	Сцп= I,мм	295	312,0002563

Ячейки переменных

Ячейка	Имя	Исходное значение	Окончательное значение	Целочисленное
\$B\$6	I,A	200	247,9159022	Продолжить
\$C\$6	I,мм	84,47692308	81,25081371	Продолжить
\$D\$6	m,r/c	0,5	0,47687503	Продолжить

Ограничения

Ячейка	Имя	Значение ячейки	Формула	Состояние	Допуск
\$C\$10	Сцп= I,мм	312,0002563	\$C\$10=312	Привязка	0
\$B\$6	I,A	247,9159022	\$B\$6<=\$I\$6	Без привязки	2,084097796
\$B\$6	I,A	247,9159022	\$B\$6>=\$I\$7	Без привязки	47,9159022
\$C\$6	I,мм	81,25081371	\$C\$6<=\$I\$6	Без привязки	68,74918629
\$C\$6	I,мм	81,25081371	\$C\$6>=\$I\$7	Без привязки	31,25081371
\$D\$6	m,r/c	0,47687503	\$D\$6<=\$K\$6	Без привязки	0,02312497
\$D\$6	m,r/c	0,47687503	\$D\$6>=\$K\$7	Без привязки	0,17687503

Отчет о результатах рационального подбора параметров нанесения композитных покрытий (б)

Microsoft Excel 14.0 Отчет о результатах

Лист: [Подбор режимов плаз нап.xlsx]Лист2

Отчет создан: 06.11.2020 20:43:01

Результат: Решение найдено. Все ограничения и условия оптимальности выполнены.

Модуль поиска решения

Модуль: Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ

Время решения: 0,015 секунд.

Число итераций: 2 Число подзадач: 0

Параметры поиска решения

Максимальное время Без пределов, Число итераций Без пределов, Precision 0,000001, Использовать автоматическое масштабирование

Сходимость 0,0001, Размер совокупности 100, Случайное начальное значение 0, Правые производные, Обязательные границы

Максимальное число подзадач Без пределов, Максимальное число целочисленных решений Без пределов, Целочисленное отклонение 1%, Считать неотрицательными

Ячейка целевой функции (Значение)

Ячейка	Имя	Исходное значение	Окончательное значение
\$D\$11	Сцп=I,мм	291,9964615	315,000292

Ячейки переменных

Ячейка	Имя	Исходное значение	Окончательное значение	Целочисленное
\$C\$7	I,A	200	233,3990673	Продолжить
\$D\$7	I,мм	84,47692308	82,973831	Продолжить
\$E\$7	п,мин-1	0,5	35	Продолжить

Ограничения

Ячейка	Имя	Значение ячейки	Формула	Состояние	Допуск
\$D\$11	Сцп=I,мм	315,000292	\$D\$11=315	Привязка	0
\$C\$7	I,A	233,3990673	\$C\$7<=I\$7	Без привязки	16,60093272
\$C\$7	I,A	233,3990673	\$C\$7>=I\$8	Без привязки	33,39906728
\$D\$7	I,мм	82,973831	\$D\$7<=K\$7	Без привязки	67,026169
\$D\$7	I,мм	82,973831	\$D\$7>=K\$8	Без привязки	32,973831
\$E\$7	п,мин-1	35	\$E\$7<=L\$7	Без привязки	20
\$E\$7	п,мин-1	35	\$E\$7>=L\$8	Привязка	0

Отчет о результатах рационального подбора параметров нанесения композитных покрытий (в)

Microsoft Excel 14.0 Отчет о результатах

Лист: [Подбор режимов плаз нап.xlsx]Лист2

Отчет создан: 06.11.2020 20:43:49

Результат: Решение найдено. Все ограничения и условия оптимальности выполнены.

Модуль поиска решения

Модуль: Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ

Время решения: 0,016 секунд.

Число итераций: 3 Число подзадач: 0

Параметры поиска решения

Максимальное время Без пределов, Число итераций Без пределов, Precision 0,000001, Использовать автоматическое масштабирование

Сходимость 0,0001, Размер совокупности 100, Случайное начальное значение 0, Правые производные, Обязательные границы

Максимальное число подзадач Без пределов, Максимальное число целочисленных решений Без пределов, Целочисленное отклонение 1%, Считать неотрицательными

Ячейка целевой функции (Значение)

Ячейка	Имя	Исходное значение	Окончательное значение
\$D\$11	Сцп=I,мм	315,000292	340,000315

Ячейки переменных

Ячейка	Имя	Исходное значение	Окончательное значение	Целочисленное
\$C\$7	I,A	233,3990673	250	Продолжить
\$D\$7	I,мм	82,973831	59,498875	Продолжить
\$E\$7	п,мин-1	35	37	Продолжить

Ограничения

Ячейка	Имя	Значение ячейки	Формула	Состояние	Допуск
\$D\$11	Сцп=I,мм	340,000315	\$D\$11=340	Привязка	0
\$C\$7	I,A	250	\$C\$7<=I\$7	Привязка	0
\$C\$7	I,A	250	\$C\$7>=I\$8	Без привязки	50
\$D\$7	I,мм	59,498875	\$D\$7<=K\$7	Без привязки	90,501125
\$D\$7	I,мм	59,498875	\$D\$7>=K\$8	Без привязки	9,498874999
\$E\$7	п,мин-1	35	\$E\$7<=L\$7	Без привязки	20
\$E\$7	п,мин-1	35	\$E\$7>=L\$8	Привязка	0

Отчет о результатах рационального подбора параметров нанесения композитных покрытий (г)

Приложение В

(справочное)

Операционная технология восстановления рабочих поверхностей шнека транспортирующего конвейера АПК

005 Моечная (А)

Оборудование (Б): ручная мойка Голиаф для крупных деталей фирмы «RUSDORF» (ГОСТ Р ИСО 90001-2015).

Материалы (М): моющее средство «Лабомид-203» (ТУ 3870738-73), концентрация 20 г/л, ветошь 25 (ГОСТ 5354-79).

Содержание (О): загрузить шнек в рабочую зону мойки, установить кран-балкой на стропах, промыть до удаления следов масла и грязи.

Приспособления, остнастка, инструмент (Т): пистолет высокого давления, резиновые перчатки (ГОСТ 124015-82).

Режимы: температура – 70...90 °С.

Норма времени: $T_H=10...13$ мин.

010 Дефектовочная (А)

Оборудование (Б): два крана подвесных электрических однобалочных ГОСТ 7890-67.

Материалы (М): мадаполам (ГОСТ 7138-83).

Содержание (О): протереть рабочие поверхности шнека мадаполамом; провести визуальный контроль рабочих поверхностей; шнеки, имеющие сколы и задиры выбраковываются; провести замеры рабочих поверхностей шнека; поместить шнек на переносную подложку.

Приспособления, остнастка, инструмент (Т): ультразвуковой толщиномер NOVOTEST УТ-1 (ТУ ПРВМ.401161.004 ТУ:2018).

Норма времени: $T_H=15...18$ мин.

015 Слесарная (А)

Оборудование (Б): мобильная обитаемая дробеструйная камера BML-RC ГОСТ 31335-2006.

Материалы (М): стеклянная дробь СМШ-4 (ГОСТ Р53172-2008).

Содержание (О): дробеструйная обработка рабочих поверхностей шнека для удаления ржавчины и снятия окалины.

Приспособления, остнастка, инструмент (Т): специальный спилковый костюм, краги и защитный шлем с принудительной подачей воздуха через фильтр (СП 1.3.3118-13).

Норма времени: $T_H=15...18$ мин.

020 Моечная (А)

Оборудование (Б): моечный комплекс для промышленной очистки деталей AM5000 BS (ГОСТ Р ИСО 90001-2015).

Материалы (М): вода техническая (ГОСТ 237332-79).

Содержание (О): загрузить шнек в рабочую зону мойки, установить кран-балкой на стропах, промыть последовательно горячей (80...90 °С) и холодной водой.

Приспособления, оснастка, инструмент (Т): загрузочная платформа, рампы, трубопроводы с форсунками из нержавеющей стали AISI 304.

Норма времени: $T_H=10...13$ мин.

025 Напыление (А)

Оборудование (Б): установка плазменного напыления УПУ-3Д (ГОСТ 28076-89) и универсальная система подачи СОЖ Universal CB-13L (ГОСТ Р 50558-93).

Материалы (М): 76,5 % самофлюсующегося порошка ПР-НХ17СР4 фракцией 40-64 мкм (ГОСТ 21448-75) и 23,5 % карбида титана с фракцией 63-80 мкм (ТУ 304-2002), смазочно-охлаждающая жидкость (ГОСТ Р 52338-2005).

Содержание (О): нанести композитное покрытие на рабочие поверхности шнека; при обработке винтовых поверхностей подавать с противоположной стороны напыления СОЖ с целью недопущения критического снижения прочности детали.

Приспособления, оснастка, инструмент для напыления (Т): плазмотрон ПНК-50 с межэлектродной вставкой (ГОСТ 14254-80).

Режимы напыления: напряжение на дуге - 260 В; сила тока дуги плазмотрона 233...248 А, дистанция напыления 81...83 мм, массовый расход напыляемого материала 0,4...0,5 г/с, скорость вращения детали 35...37 мин⁻¹ (для цилиндрической поверхности), подача 4...6 мм/об, скорость перемещения плазмотрона 3...7 мм/мин, объемный расход плазмообразующего газа 0,8...1,8 л/с.

Норма времени: $T_H=18...20$ мин.

030 Слесарная (А)

Оборудование (Б): полировальная шлифмашина Диолд МП-0,5 (ГОСТ ИЕС 60745-1-2011)

Материалы (М): войлочный круг Flexione 125 мм; высокоабразивная полировальная паста Menzerna Heavy Cut Compound 1000; низкоабразивная доводочная полировальная паста Menzerna Final Finish 3000.

Содержание (О): высокоабразивная полировка, низкоабразивная полировка восстановленных поверхностей шнека.

Норма времени: $T_H=20...25$ мин.

035 Контрольная (А)

Оборудование (Б): два крана подвесных электрических однобалочных ГОСТ 7890-67.

Содержание (О): провести замеры восстановленных поверхностей шнека.

Приспособления, оснастка, инструмент (Т): ультразвуковой толщиномер NOVOTEST УТ-1 (ТУ ПРВМ.401161.004 ТУ:2018).

Норма времени: $T_H=8...10$ мин.

Приложение Г
(справочное)

Численность работающих по вариантам техпроцесса

Категория работающих	Численность работающих	Квалификационный разряд
Производственные рабочие	3	5-6
Вспомогательные рабочие	2	3-5
Руководители и специалисты	1	11-13
Служащие	1	8-11
Всего рабочего персонала	7	-

Величина инвестиций по вариантам проекта

Наименование групп инвестиций	Проектный вариант	
	Количество	Сумма, млн. у.е.
1. Здания и сооружения, м ²	1	0,06300
2. Рабочие машины и оборудование, шт.	2	0,143000
3. Транспортные средства, шт.	2	0,00220
4. Производственный инвентарь, шт.	-	0,00040
5. Итого основных фондов	-	0,20860
6. Оборотные средства	-	0,40500
7. Всего инвестиций	-	0,61360

Годовой фонд заработной платы работающих

Категории работающих	Годовой фонд основной заработной платы, у.е.	Годовой фонд дополнительной заработной платы, у.е.	Итого, млн. у.е.
Производственные рабочие	48204,416	5302,485	0,053506
Вспомогательные рабочие	37440	2620,8	0,040060
Руководители, специалисты или служащие	9984	-	0,009984
Всего	95628,416	7923,285	0,10355

Смета расходов на содержание и эксплуатацию оборудования

№ п/п	Наименование статей	Сумма, млн. у.е.
1.	Амортизация оборудования и транспортных средств	0,0001005
2.	Содержание оборудования	0,004342
3.	Основная и дополнительная зарплата вспомогательных рабочих	0,040060
4.	Текущий ремонт оборудования, транспортных средств и ценного инструмента	0,000217
5.	Внутризаводское перемещение грузов	0,000100
6.	Износ малоценных и быстроизнашивающихся инструментов и приспособлений	0,000500
7.	Итого	0,0453195

Смета расходов по организации, обслуживанию и управлению производством

№п/п	Наименование статей	Сумма,
1.	Содержание аппарата управления	0,009984
2.	Амортизация зданий, сооружений и инвентаря	0,000408
3.	Содержание зданий, сооружений и инвентаря	-
4.	Текущий ремонт зданий, сооружений и инвентаря	0,000441
5.	Испытания, опыты и исследования, рационализация и изобретательство	0,000840
6.	Охрана труда	0,000490
7.	Износ малоценного и быстро изнашиваемого инвентаря	0,000420
8.	Прочие расходы	0,000352
9.	Итого:	0,014455

Калькуляция полной себестоимости годового выпуска продукции

№п/п	Наименование калькуляционных статей	Сумма затрат, млн. у.е.
1.	Затраты на основные и вспомогательные материалы	2,089335
2.	Топливо и энергия на технологические цели	0,013837
3.	Основная заработная плата производственных рабочих	0,048204
4.	Налоги, отчисления в бюджет и внебюджетные фонды	0,031272
5.	Износ инструментов и приспособлений целевого	0,000420
7.	Общепроизводственные расходы, в том числе:	0,112780
7.1	Материальные затраты	0,008722
7.2	Амортизационные отчисления	0,000508
7.3	Расходы на оплату труда	0,103550
8.	Итого цеховая себестоимость	2,408628
9.	Общехозяйственные расходы, в том числе:	0,036151
9.1	Материальные затраты	0,023499
9.2	Амортизационные отчисления	0,007230
9.3	Расходы на оплату труда	0,005422
10.	Производственная себестоимость	2,444779
11.	Коммерческие расходы	0,008991
12.	Полная себестоимость годового выпуска продукции	2,45377