

На правах рукописи



АНДРЮШКИН Александр Юрьевич

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА
СРЕДСТВ КОЛЛЕКТИВНОЙ ТЕПЛОЗАЩИТЫ
РАБОТНИКОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

05.26.01 – Охрана труда (в машиностроении)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург
2021 г.

Работа выполнена в Балтийском государственном техническом университете
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Научный консультант:
Доктор технических наук, доцент

Шашурин Александр Евгеньевич

Официальные оппоненты:

Шкрабак Владимир Степанович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
«Безопасность технологических процессов и производств» ФГБОУ ВО «Санкт-
Петербургский государственный аграрный университет»

Барбин Николай Михайлович, доктор технических наук, доцент, ведущий научный
сотрудник Уральского института государственной противопожарной службы МЧС России,
г.Екатеринбург.

Черный Константин Анатольевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой
«Безопасность жизнедеятельности» ФГАОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет»

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет»

Защита состоится «21» октября 2021 в 14.00 на заседании диссертационного совета
24.2.272.01 (Д.212.010.01) в Балтийском государственном техническом университете
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская
ул., д.1, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Балтийского государственного
технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова и на сайте <http://voenmeh.ru/>

Автореферат разослан «___» августа 2021г.

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 1-я
Красноармейская ул., д.1. ученому секретарю диссертационного совета Дроздовой Л.Ф.
e-mail: drozdova_lf@voenmeh.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета



Дроздова Людмила Филипповна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертации. В отраслевой структуре экономики России машиностроение занимает 20,5% от всей промышленности. В настоящее время функционирует более 50000 машиностроительных предприятий, на них трудятся более 30% работников, занятых в промышленности. Основными факторами производственной среды, отрицательно влияющими на здоровье работников, являются: шум, химические факторы, аэрозоли, микроклимат. Доля сотрудников, у которых условия труда угрожают их жизни и здоровью, составляет 38,3%, при этом около 50% профзаболеваний работников обусловлено неблагоприятным микроклиматом на рабочих местах. Поэтому на предприятиях машиностроения актуально создание безопасных рабочих мест с благоприятным микроклиматом.

По ГОСТ 12.0.003-2015 к активным опасным и вредным производственным факторам (ОВПФ) относятся термические факторы: температура нагретых и холодных поверхностей оборудования, температура открытого огня и нагретых до высокой температуры заготовок, аномальная температура воздуха, тепловое излучение. Значительную опасность представляют термические факторы литейных, кузнечнопрессовых, сварочных производств, она обусловлена нагреванием изделий и материалов до высоких температур. Производственные помещения, где явное удельное тепловыделение превышает 23 Вт/м^3 , относят к горячим помещениям или цехам. Избыточные тепловыделения ухудшают микроклимат в цехах и помещениях машиностроительных предприятий, создают тяжелые условия труда для работников.

К средствам коллективной теплозащиты (СКТЗ) работников относят стационарные и передвижные перегородки, экраны и кожухи, а также теплоизоляцию нагретых или холодных поверхностей оборудования, трубопроводов и воздухопроводов. Эффективность локализации теплового потока за счет отражения, поглощения или отвода тепла обусловлена качеством применяемых в СКТЗ материалов и покрытий. Качество покрытия определяется наличием дефектов и обеспечивается рациональными технологическими параметрами его нанесения. Рентабельно формировать отражающие и теплоизоляционные покрытия СКТЗ напылением. Показатели качества покрытия СКТЗ обуславливают безопасность работников.

Отказ покрытия постепенно или внезапно приводит СКТЗ в опасное неработоспособное состояние. Причинами возникновения отказов покрытий являются допустимые производственные дефекты и технологические отклонения, развивающиеся во время эксплуатации. Из-за них снижается однородность покрытия, обуславливающая в условиях внешних воздействий возникновение и развитие повреждений. Неоднородность покрытия сильно влияет на показатели его качества и проявляется в масштабном эффекте – изменении свойств образцов покрытий с дефектами в зависимости от их размеров (площади сечения, объема). Поэтому актуально развитие научного направления по повышению качества СКТЗ работников за счет рационального применения напыленных многослойных покрытий.

Вопросами повышения качества теплозащитных конструкций занимались Цыплаков О.Г., Сигаев А.Б., Галинская О.О., Умнякова Н.П., Табунщиков Ю.А., вопросами снижения рисков в техносфере и безопасности в промышленности Русак О.Н., Шкрабак В.С., Махутов Н.А., Ямалетдинова К.Ш., Гоц С.С., Гражданкин А.И., Лисанов М.В. и другие.

Перспективным технологическим методом формирования качественных многослойных покрытий является сверхзвуковое газодинамическое напыление при многоструйной подаче газа. Отсутствие опасных дефектов в материале напыленного покрытия обеспечивается его многослойностью, так размер дефекта не может превышать толщину одного нанесенного слоя, а также повышением однородности материала из-за малых размеров распыленных капель, образовавшихся за счет высокой скорости истечения взаимодействующих между собой сверхзвуковых струй газа, и возникающей при этом развитой системе скачков уплотнения.

Исходя из изложенного выше, можно сформулировать **актуальную проблему**: повышение качества покрытий средств коллективной теплозащиты за счет применения рациональных технологических параметров сверхзвукового газодинамического напыления.

Таким образом, в диссертации выдвинута **гипотеза** – параметры технологического процесса сверхзвукового газодинамического напыления обуславливают дефектность и показатели качества покрытия средства коллективной теплозащиты, а следовательно, вероятность его отказа.

Цель диссертации: научное обоснование применения сверхзвукового газодинамического напыления при многоструйной подаче газа для повышения показателей качества многослойных покрытий средств коллективной теплозащиты, обеспечивающих улучшение условий труда и безопасность работников машиностроения.

Объект исследования: показатели качества многослойных покрытий средств коллективной теплозащиты, обусловленные технологическими параметрами сверхзвукового газодинамического напыления при многоструйной подаче газа, и методы их оценки.

Предмет исследования: закономерности влияния технологических параметров сверхзвукового газодинамического напыления при многоструйной подаче газа на показатели качества многослойных покрытий средств коллективной теплозащиты, а также на вероятность их отказа.

Методы исследования. При проведении исследований использовались методы планирования эксперимента, статистики, функционального анализа, теории вероятностей, лабораторные и патентные исследования.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Разработаны модели определения нормируемых размеров производственного дефекта по показателю качества покрытия средства коллективной теплозащиты.

2. Разработана методика прогнозирования уровня риска отказа покрытия средства коллективной теплозащиты по уровню производственной дефектности и уровню производственного контроля.
3. Теоретически получены закономерности влияния числа слоев и дефектности многослойного покрытия средства коллективной теплозащиты на его показатели качества и на вероятность отказа.
4. Разработан метод уточняемого компенсирующего слоя для обеспечения размерной точности средства коллективной теплозащиты с многослойным покрытием.
5. Разработана концепция применения сверхзвукового газодинамического напыления при многоструйной подаче газа для формирования качественных многослойных покрытий средств коллективной теплозащиты.

Практическая ценность (полезность) работы состоит в следующем.

1. Предложены технические решения средств коллективной теплозащиты с напыленными интегральными теплоизоляционными и отражающими многослойными покрытиями.
2. Экспериментально установлены закономерности влияния технологических параметров сверхзвукового газодинамического напыления при многоструйной подаче газа на показатели качества многослойного покрытия средства коллективной теплозащиты и вероятность его отказа.
3. Апробирован метод уточняемого компенсирующего слоя при формировании пенополиуретанового покрытия заданной размерной точности по толщине.
4. Предложены технические решения по изготовлению сверхзвуковых газодинамических узлов распыления с многоструйной подачей газа методом селективного лазерного плавления.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных методов экспериментальных исследований и методов обработки полученных результатов, сравнением экспериментальных и расчетных данных между собой, а также с результатами полученными другими исследователями. Основные положения работы, выводы и рекомендации подтверждены экспериментально, и реализованы в промышленности.

Апробация диссертационной работы. Научные результаты диссертации докладывались в период с 2000 по 2020г.г. на 20 научно-технических семинарах и конференциях, в том числе: IX Всероссийская НТК «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Обеспечение комплексной безопасности жизнедеятельности населения», СПб УГПС МЧС России, 2017г; VI Мемориальный семинар профессора Б.Е. Гельфанда и XIII Международная НТК «Комплексная безопасность и физическая защита», СПб УГПС МЧС России, 2017г.; XIV Международная НТК, посвященная Году культуры безопасности «Комплексные проблемы техносферной безопасности. Актуальные вопросы безопасности при формировании культуры безопасной жизни», СПб УГПС МЧС России, 2018г.;

Международная НТК, посвященная 370-й годовщине образования пожарной охраны России «Современные пожаробезопасные материалы и технологии», ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС Министерства РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. 2019г.; XXXII НПК «Актуальные проблемы пожарной безопасности», СПб УГПС МЧС России, 2020г.

Публикации. Основные положения и результаты диссертации отражены в 125 опубликованных научных работах, из них - 2 монографии, 32 патента РФ, 91 статья, из которых 60 статей опубликованы в журналах из перечня рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых ВАК РФ (непосредственно по теме диссертации 17 статей и 9 патентов).

Оригинальность полученных в ходе работы над диссертацией разработок подтверждена 32 патентами РФ (непосредственно по теме диссертации 9 патентов).

Личный вклад соискателя состоит в выдвижении и обосновании идей, гипотез; в разработке и изготовлении ключевых элементов экспериментальных установок, узлов распыления, образцов покрытий для испытаний; в проведении экспериментов, в сборе, обработке и анализе экспериментальных данных; в оформлении результатов диссертации и при подготовке публикаций по выполненной работе.

Внедрение результатов. Основные положения работы, выводы и рекомендации были реализованы на предприятиях: Государственная корпорация «РОСТЕХНОЛОГИИ» ФГУП «Ленинградский Северный завод» (г. Санкт-Петербург); ООО СКБ «ВЗЛЕТ» (г. Санкт-Петербург); ООО «М-Графика» (г. Санкт-Петербург); ООО НОЦ «Специальные приборы и медицинские технологии» (г. Санкт-Петербург); ООО ПКМ «Лиомикс» (г. Санкт-Петербург); ООО «РВС» (г. Санкт-Петербург); ООО «Трибойл» (г. Санкт-Петербург); ООО «Химреапласт» (г. Санкт-Петербург); АО «НПФ «Спецмаш» (г. Санкт-Петербург); ООО «Техмаш СПб» (г. Санкт-Петербург), ПАО «Ижорские заводы» (г. Санкт-Петербург), в учебном процессе ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России.

На защиту выносятся следующие научные положения.

1. Модели определения нормируемых размеров производственного дефекта по показателю качества покрытия средства коллективной теплозащиты.
2. Методика прогнозирования уровня риска отказа покрытия средства коллективной теплозащиты по уровню производственной дефектности и уровню производственного контроля.
3. Теоретические закономерности влияния числа слоев и дефектности многослойного покрытия средства коллективной теплозащиты на его показатели качества и на вероятность отказа.
4. Метод уточняемого компенсирующего слоя для обеспечения размерной точности средства коллективной теплозащиты с многослойным покрытием.
5. Концепция применения сверхзвукового газодинамического напыления при

многоструйной подаче газа для формирования качественных многослойных покрытий средств коллективной теплозащиты.

6. Экспериментальные закономерности влияния технологических параметров сверхзвукового газодинамического напыления при многоструйной подаче газа на показатели качества многослойного покрытия средства коллективной теплозащиты и вероятность его отказа.

7. Технические решения по изготовлению сверхзвуковых газодинамических узлов распыления с многоструйной подачей газа методом селективного лазерного плавления.

8. Технические решения средств коллективной теплозащиты с напыленными интегральными теплоизоляционными и отражающими многослойными покрытиями.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, содержит 272 страницы, в том числе 52 таблицы, 119 рисунков и фотографий, список литературы из 378 наименований и 3 приложений.

Краткое содержание работы

Во введении отражены актуальность темы диссертации, цель, объект и предмет исследования, методы исследования, научная новизна, практическая ценность, апробация результатов, выносимые на защиту положения.

В первой главе проанализировано состояние проблемы, поставлены задачи исследования. На предприятиях машиностроения объектами интенсивных тепловыделений являются печи, котлы, газоходы, теплообменники, сосуды, емкости и резервуары с жидкостями, дымовые трубы, технологические трубопроводы и воздухопроводы. Поэтому работники подвергаются воздействию ОВПФ, среди которых ведущую роль играют термические факторы микроклимата: температура воздуха, температуры поверхностей на рабочих местах, тепловое облучение.

Результаты специальной оценки условий труда (СОУТ) свидетельствуют о том, что фактические значения показателей микроклимата часто не соответствуют нормативным значениям. Неблагоприятный микроклимат ухудшает условия труда персонала, обуславливает вероятность получения работниками травм и ожогов, снижает эффективность труда работников. Рассмотрено негативное влияние высокой и низкой температуры, а также теплового облучения на организм человека. Поэтому актуально применение СКТЗ, улучшающих микроклимат в производственных помещениях и обеспечивающих безопасность работников. Согласно ГОСТ 12.4.011-89 СКТЗ предохраняют работников: от увеличенного уровня тепловых излучений; от высоких и низких температур поверхностей оборудования, материалов, заготовок; от высоких и низких температур воздуха.

Традиционные теплоизоляционные технические решения разнообразны как по применяемым материалам, так и по конструкциям. При температуре источника 50-150°C эффективна теплоизоляция из газонаполненных пластмасс (ГНПМ), имеющих

теплопроводность $\lambda_{\text{ГНПМ}}=0,025-0,200 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°К)}$. Для локализации источников тепла эффективно применение теплозащитных конструкций: стационарных и передвижных перегородок, экранов, кожухов. Разнообразие традиционных технических решений обуславливает существенный разброс показателей качества СКТЗ. Теплозащитные конструкции изготавливаются индивидуально, из доступных материалов, что обуславливает низкое качество СКТЗ. Поэтому актуально применение технологий и технических решений, обеспечивающих высокое качество СКТЗ.

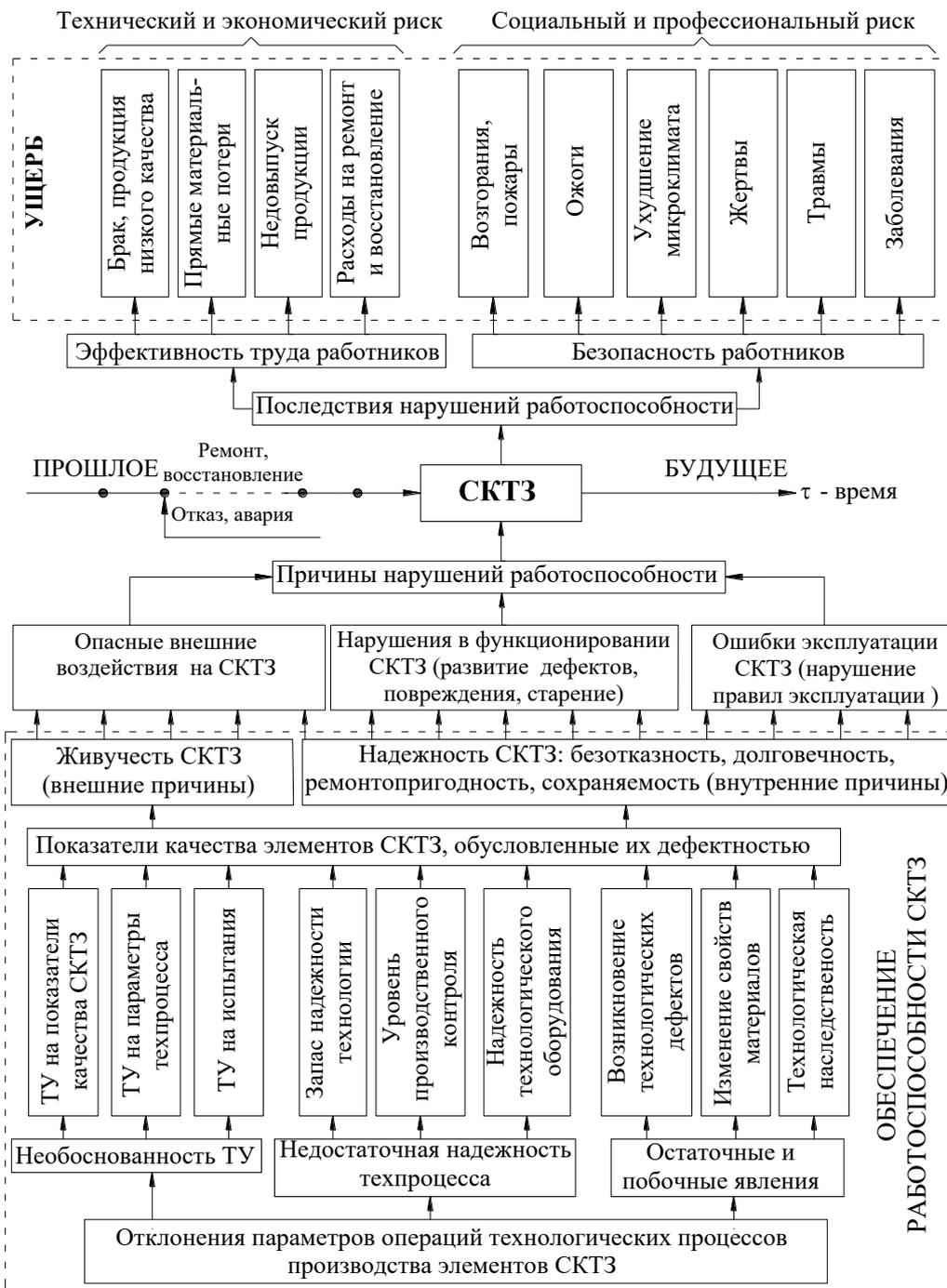


Рис. 1. Функциональная модель развития риска СКТЗ с учетом технологии его производства

Показателем безопасности работников являются количественно определенные риски: $R_{\text{СКТЗ}} = \sum_i^{N_{\text{oc}}} V_{\text{oc}i} \cdot U_{\text{oc}i} \leq [R_{\text{СКТЗ}}]$, где $R_{\text{СКТЗ}}$ – риск СКТЗ; $[R_{\text{СКТЗ}}]$ – приемлемый

(допускаемый) риск; V_{oci} – вероятность опасного i -го события; U_{oci} – ожидаемый ущерб в результате i -го события; N_{oc} – число опасных событий. Оценку риска отказа элемента СКТЗ можно разделить на два самостоятельных этапа: оценка вероятности отказа элемента СКТЗ $V_{отк}$ и оценка ожидаемого ущерба. На первом этапе оценивают вероятность отказа элемента СКТЗ $V_{отк}$, которая не должна превышать допускаемую вероятность отказа элемента СКТЗ $[V_{отк}]$, то есть $V_{отк} \leq [V_{отк}]$. На втором этапе задают конкретные опасные условия и ситуации эксплуатации СКТЗ и оценивают ожидаемый ущерб. Поэтому для оценки риска элемента СКТЗ в одинаковых условиях и ситуациях достаточно оценить вероятность его отказа $V_{отк}$.

Предложена функциональная модель развития риска СКТЗ с учетом технологии производства его элементов (рис. 1). Анализ модели показывает, что технология изготовления обуславливает качество и работоспособность СКТЗ, а следовательно, эффективность труда и безопасность работников, а также возникающие в конкретных условиях эксплуатации СКТЗ риски.

Для обеспечения теплоизоляционных или теплоотражающих функций в СКТЗ применяют специальные конструктивные элементы, в частности покрытия. Покрытия получили широкое распространение, так как эффект от их применения внушителен – повышается надежность и живучесть СКТЗ, а финансовые и материальные затраты незначительны. Можно выделить причинно-следственную связь производственной дефектности покрытия СКТЗ с безопасностью работников – чем ниже производственная дефектность покрытия, тем выше его качество, а, значит, меньше вероятность отказа, следовательно, выше безопасность работников.

Дан краткий обзор покрытий СКТЗ. Рассмотрены защитные покрытия, теплоизоляционные ГНПМ, а также огнезащитные вспучивающиеся покрытия, эффективные при защите металлических конструкций при высоких температурах, а в процессе эксплуатации выполняющие функции лакокрасочного покрытия.

Рассмотрено состояние вопроса распыления композиций (жидкостей). Проанализированы методы распыления, показано, что перспективно сверхзвуковое газодинамическое напыление с многоструйной подачей газа для повышения дисперсности распыленных капель и формирования однородных покрытий.

Во второй главе разработан подход к прогнозированию уровня риска отказа покрытия СКТЗ по уровню производственной дефектности. Предложено выражение для прогнозирования эксплуатационной дефектности покрытия по производственной дефектности:

$$g_{\text{деф_эксп}}(\tau) = (g_{\text{деф}})^{1 - (\tau/\tau_p)^{K_{\text{эксп}}}} \leq [g_{\text{деф_эксп}}], \quad (1)$$

где $g_{\text{деф_эксп}}$ – эксплуатационная дефектность покрытия; $[g_{\text{деф_эксп}}]$ – допускаемая эксплуатационная дефектность покрытия; $g_{\text{деф}}$ – производственная дефектность покрытия; $K_{\text{эксп}}$ – коэффициент, характеризующий процесс изменения дефектности в заданных условиях эксплуатации ($K_{\text{эксп}} > 0$); τ – время, с; τ_p – ресурс покрытия, с.

Метод формирования покрытия СКТЗ должен обеспечивать минимальную производственную дефектность при введении его в эксплуатацию. Для этого должно выполняться производственное задание по контролируемым показателям качества покрытия. Вероятность выполнения задания по всем контролируемым показателям качества покрытия определяют по формуле: $P_{ВЗ}(g_{деф}) = \prod_{k=1}^{N_k} P_{квз}(g_{деф})$, где N_k – число показателей качества покрытия; $P_{квз}(g_{деф})$ – вероятность выполнения задания по k -ому показателю качества покрытия при производственной дефектности $g_{деф}$; $P_{ВЗ}(g_{деф})$ – вероятность выполнения задания по всем контролируемым показателям качества покрытия при производственной дефектности $g_{деф}$. Производственная дефектность $g_{деф}$ покрытия является интегральным показателем и учитывает дефекты различных видов, поэтому примем допущение, и в дальнейшем, вместо производственной дефектности $g_{деф}$ покрытия, будем рассматривать условный производственный дефект с размером x .

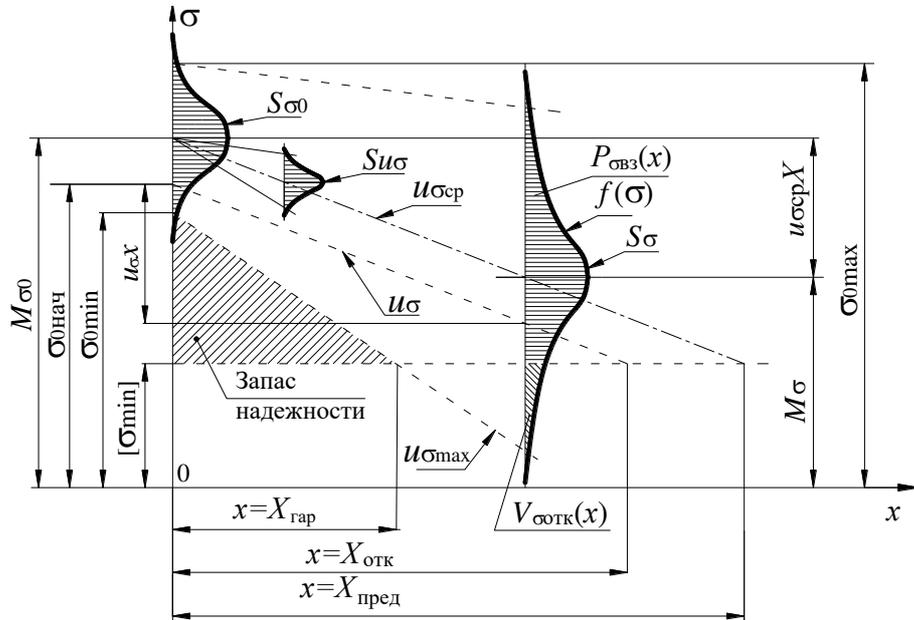


Рис. 2. Линейная модель нормирования размера производственного дефекта по прочности покрытия:
 $\sigma_{0нач}$ – начальная прочность; u_σ – показатель, учитывающий изменение прочности в зависимости от размера производственного дефекта; x – размер производственного дефекта; $X_{отк}$ – размер производственного дефекта, не приводящий к отказу; $X_{пред}$ – предельный размер производственного дефекта, не приводящий к опасному состоянию; $X_{гар}$ – максимальный размер производственного дефекта, не влияющий на прочность; $[\sigma_{min}]$ – допустимая минимальная прочность; σ_{0min} – минимальная прочность при отсутствии производственной дефектности; M_σ – математическое ожидание прочности; M_{σ_0} – математическое ожидание прочности при отсутствии производственной дефектности, то есть при настроенной технологической системе; $u_{\sigma ср}$ – математическое ожидание показателя, учитывающего изменение прочности в зависимости от размера производственного дефекта; $u_{\sigma max}$ – максимальное значение показателя, учитывающего изменение прочности в зависимости от размера производственного дефекта; S_σ – среднее квадратическое отклонение прочности; S_{σ_0} – среднее квадратическое отклонение прочности при отсутствии производственной дефектности, то есть при настроенной технологической системе; S_{u_σ} – среднее квадратическое отклонение показателя, учитывающего изменение прочности в зависимости от размера производственного дефекта; $V_{отк}(x)$ – вероятность отказа покрытия по прочности; $P_{свз}(x)$ – вероятность выполнения производственного задания по прочности покрытия

Дано обоснование норм производственной дефектности по надежности и безопасности покрытий СКТЗ. Выделены нормируемые размеры производственного дефекта, определяющие состояние покрытия:

- $X_{отк}$ – максимальный размер производственного дефекта, неприводящий к отказу по определенному показателю качества покрытия;
- $X_{пред}$ – предельный размер производственного дефекта, неприводящий к опасному состоянию покрытия по определенному показателю качества;
- $X_{гар}$ – максимальный размер производственного дефекта, невливающий на показатель качества покрытия.

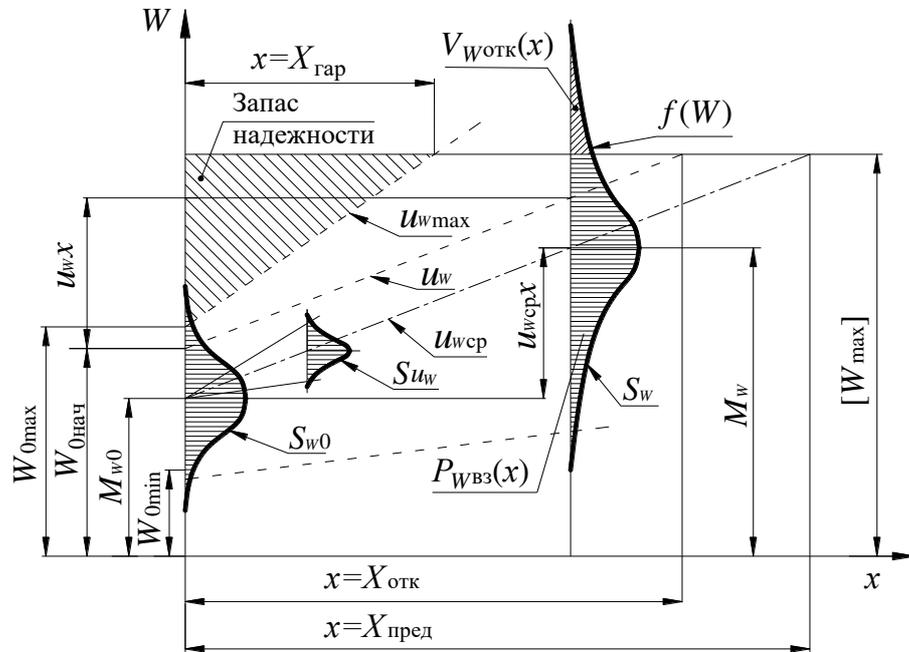


Рис. 3. Линейная модель нормирования размера производственного дефекта по водопоглощению покрытия: $W_{0нач}$ – начальное водопоглощение; u_W – показатель, учитывающий изменение водопоглощения в зависимости от размера производственного дефекта; x – размер производственного дефекта; $X_{отк}$ – размер производственного дефекта, неприводящий к отказу; $X_{пред}$ – предельный размер производственного дефекта, неприводящий к опасному состоянию; $X_{гар}$ – максимальный размер производственного дефекта, невливающий на водопоглощение; $[W_{max}]$ – допускаемое максимальное водопоглощение; W_{0max} – максимальное водопоглощение при отсутствии производственной дефектности; M_W – математическое ожидание водопоглощения; M_{W0} – математическое ожидание водопоглощения при отсутствии производственной дефектности, то есть при настроенной технологической системе; $u_{Wср}$ – математическое ожидание показателя, учитывающего изменение водопоглощения в зависимости от размера производственного дефекта; u_{Wmax} – максимальное значение показателя, учитывающего изменение водопоглощения в зависимости от размера производственного дефекта; S_W – среднее квадратическое отклонение водопоглощения; S_{W0} – среднее квадратическое отклонение водопоглощения при отсутствии производственной дефектности, то есть при настроенной технологической системе; S_{u_W} – среднее квадратическое отклонение показателя, учитывающего изменение водопоглощения в зависимости от размера производственного дефекта; $V_{Wотк}(x)$ – вероятность отказа покрытия по водопоглощению; $P_{Wвз}(x)$ – вероятность выполнения производственного задания по водопоглощению покрытия

Производственные дефекты с размерами $x > X_{отк}$ влияют на надежность покрытия, а с размерами $x > X_{пред}$ – на безопасность покрытия. Технология формирования покрытия должна обеспечивать производственную дефектность, при которой выполняются условия по надежности и безопасности покрытия:

- 1) вероятность отказа по k -ому показателю качества покрытия $V_{kотк} \leq [V_{kотк}]$, где $[V_{kотк}]$ – допускаемая вероятность отказа по k -ому показателю качества покрытия.
- 2) вероятность возникновения опасного состояния по k -ому показателю качества покрытия $V_{kпред} \leq [V_{kпред}]$, где $[V_{kпред}]$ – допускаемая вероятность возникновения опасного состояния по k -ому показателю качества покрытия.

Разработаны модели определения нормируемых размеров производственного дефекта по прочности и водопоглощению покрытия СКТЗ (рис. 2 и рис. 3)

Разработана методика оценки уровня производственной дефектности покрытия СКТЗ. При контроле покрытия его поверхность разбивают на контролируемые участки, при этом производственную дефектность $g_{\text{деф}}$ рассчитывают по выражению:

$$g_{\text{деф}} = \frac{1}{N_{\text{уч}}} \cdot \sum_i^{N_{\text{уч}}} g_{\text{деф}_{\text{уч}}} \leq [g_{\text{деф}}], \text{ где } g_{\text{деф}} - \text{ производственная дефектность покрытия;}$$

$g_{\text{деф}_{\text{уч}}}$ – производственная дефектность контролируемого участка; $N_{\text{уч}}$ – число контролируемых участков покрытия, шт; $[g_{\text{деф}}]$ – допуская производственная дефектность покрытия. Производственная дефектность участка покрытия:

$$g_{\text{деф}_{\text{уч}}} = \sum_i^{N_{\text{вд}}} (g_{\text{деф}_{\text{вд}}} \cdot k_{\text{опас}_{\text{вд}}}), \text{ где } g_{\text{деф}_{\text{вд}}} - \text{ производственная дефектность}$$

определенного вида на контролируемом участке; $N_{\text{вд}}$ – число видов производственных дефектов на контролируемом участке; $k_{\text{опас}_{\text{вд}}}$ – коэффициент опасности, характеризующий определенный вид производственного дефекта. Производственная дефектность контролируемого участка покрытия $g_{\text{деф}_{\text{уч}}}$ учитывает одновременно величину, количество, виды производственных дефектов. Разработана классификация производственных дефектов покрытий. Для каждого вида дефекта количественно определено значение коэффициента опасности $k_{\text{опас}_{\text{вд}}}$. Установлены уровни качества покрытия, зависящие от размеров производственных дефектов и их количества.

Разработана методика прогнозирования уровня риска отказа покрытия СКТЗ по уровню производственной дефектности и уровню производственного контроля:

1. *Текущее производственное состояние покрытия.* Оценка производственной дефектности $g_{\text{деф}}$, при этом должно выполняться условие $g_{\text{деф}} \leq [g_{\text{деф}}]$, то есть покрытие считается годным.

2. *Ранжирование покрытия по уровню производственной дефектности.* Сортировка покрытия по уровню производственной дефектности $g_{\text{деф}1}, \dots, g_{\text{деф}5}$.

3. *Определение скорости изменения параметров текущего производственного состояния покрытия.* Определение скорости изменения параметров текущего производственного состояния $\frac{d g_{\text{деф}}}{d \tau}$.

4. *Определение времени настройки технологической системы формирования покрытия.* Оценка τ_v - время достижения покрытием состояния отказа по допуская производственной дефектности.

5. *Определение уровней вероятности отказа покрытия.* Установление уровней вероятности отказа покрытия по уровню производственной дефектности и уровню производственного контроля $V_{\text{отк}i} = f(g_{\text{деф}i}, K_{\text{произ}i})$.

6. *Определение ожидаемого ущерба при отказе покрытия.* Оценка уровней ожидаемого ущерба $U_{\text{отк}j}$ при отказе покрытия во время эксплуатации.

7. *Прогнозирование уровня риска отказа покрытия.* Прогнозирование уровня риска отказа покрытия во время его эксплуатации по производственной дефектности $R_{откi,j} = V_{откi} \cdot U_{откj} \leq [R_{отк}]$.

8. *Ранжирование риска отказа покрытия.* Составление матрицы прогнозирования риска отказа покрытия $R_{откi,j}$ (рис. 4). Выявление наиболее опасных ситуаций.

Уровень вероятности отказа	$V_{отк5}$	$R_{отк5,1}$	$R_{отк5,2}$	$R_{отк5,3}$	$R_{отк5,4}$	$R_{отк5,5}$	<p>Очень низкий риск: $R_{отк1,1}, R_{отк1,2}, R_{отк2,1}, R_{отк2,2}, R_{отк3,1}, R_{отк3,2}$</p> <p>Низкий риск: $R_{отк1,3}, R_{отк1,4}, R_{отк2,3}, R_{отк4,1}, R_{отк4,2}, R_{отк5,1}$</p> <p>Средний риск: $R_{отк1,5}, R_{отк2,4}, R_{отк3,3}, R_{отк5,2}$</p> <p>Риск выше среднего: $R_{отк2,5}, R_{отк3,4}, R_{отк4,3}, R_{отк5,3}$</p> <p>Высокий риск: $R_{отк3,5}, R_{отк4,4}, R_{отк4,5}, R_{отк5,4}, R_{отк5,5}$</p>
	$V_{отк4}$	$R_{отк4,1}$	$R_{отк4,2}$	$R_{отк4,3}$	$R_{отк4,4}$	$R_{отк4,5}$	
	$V_{отк3}$	$R_{отк3,1}$	$R_{отк3,2}$	$R_{отк3,3}$	$R_{отк3,4}$	$R_{отк3,5}$	
	$V_{отк2}$	$R_{отк2,1}$	$R_{отк2,2}$	$R_{отк2,3}$	$R_{отк2,4}$	$R_{отк2,5}$	
	$V_{отк1}$	$R_{отк1,1}$	$R_{отк1,2}$	$R_{отк1,3}$	$R_{отк1,4}$	$R_{отк1,5}$	
		$U_{отк1}$	$U_{отк2}$	$U_{отк3}$	$U_{отк4}$	$U_{отк5}$	
Уровень ущерба при отказе							

Рис. 4. Матрица прогнозирования риска отказа покрытия СКТЗ

В третьей главе дано теоретическое обоснование многослойности покрытий СКТЗ для повышения их качества. Толщина многослойного покрытия, состоящего из слоев равной толщины: $H_{пок} = N_{сл} \cdot H_c$, где H_c – толщина единичного слоя покрытия, м; $N_{сл}$ – число единичных слоев покрытия, шт. В многослойном покрытии предельный размер производственного дефекта ограничен толщиной единичного слоя, то есть в наихудшем случае $x = H_c > X_{отк}$. Предположим, что размер производственного дефекта x имеет экстримальное распределение Вейбулла $G_{деф}(x) = 1 - \exp(-x^m)$, где m – модуль Вейбулла. Параметр формы (модуль Вейбулла) m является мерой однородности распределения производственных дефектов в покрытии. Чем больше значение параметра формы m , тем меньше влияние дефектов на прочность покрытия. Малые значения параметра формы m соответствуют покрытиям с предельными значениями размеров производственных дефектов $x \rightarrow X_{пред}$. Из этого предположения получено выражение для определения вероятности отказа по k -ому показателю качества многослойного покрытия из-за наличия недопустимого производственного дефекта, размер которого ограничен толщиной одного слоя $X_{отк} < x \leq H_c$:

$$V_{котк}(H_c \geq x > X_{отк}) = 1 - \exp\left(-H_{пок} \cdot \int_{X_{отк}}^{H_c} g_{деф}(x) dx\right) = 1 - \exp\left(H_{пок} \cdot (\exp(-H_c^m) - \exp(-X_{отк}^m))\right) \quad (2)$$

где $g_{деф}(x)$ – функция плотности распределения дефектов по размерам.

Проведена теоретическая оценка влияния многослойности и дефектности покрытия СКТЗ на его прочность при отрыве от подложки и при растяжении.

Получено выражение для определения вероятности безотказной работы многослойного покрытия по прочности $P_{обр}$ при отрыве от подложки, учитывающие

число слоев и его дефектность:

$$P_{\sigma_{бр}} = 1 - V_{\sigma_{отк}} = \exp\left(-N_{сл} \cdot \left(\frac{\sigma_{пред_от}}{\sigma_{пм_от}}\right)^m\right), \quad (3)$$

Где $\sigma_{пред_от}$, $\sigma_{пм_от}$ – предел прочности покрытия и параметр масштаба при отрыве от подложки (разрушающее напряжение), Па; m – модуль Вейбулла ($m > 0$).

Получено выражение для определения вероятности безотказной работы многослойного покрытия по прочности $P_{\sigma_{бр}}$ при растяжении, учитывающие число слоев и его дефектность:

$$P_{\sigma_{бр}} = 1 - V_{\sigma_{отк}} = 1 - \exp\left(N_{сл} \cdot \left(\left(\frac{\sigma_{пред_рас}}{\sigma_{пм_рас}}\right)^m - 1\right)\right), \quad (4)$$

Где $\sigma_{пред_рас}$, $\sigma_{пм_рас}$ – предел прочности покрытия и параметр масштаба при растяжении (разрушающее напряжение), Па; m – модуль Вейбулла ($m > 0$).

Расчеты показывают, что для обеспечения высокой прочности покрытия рационально его формировать из 3-7 слоев.

Введен коэффициент прочностной ортотропии многослойного покрытия, характеризующий различие свойств по взаимно перпендикулярным направлениям.

$$k_{орт} = \left(\frac{\ln(1 - P_{\sigma_{бр}}) + N_{сл}}{-\ln(P_{\sigma_{бр}})}\right)^{\frac{1}{m}}, \quad (5)$$

где $k_{орт}$ – коэффициент прочностной ортотропии.

С увеличением модуля Вейбулла влияние числа слоев на коэффициент прочностной ортотропии снижается. Так при большом значении модуля Вейбулла $m > 10$ и при числе слоев $N_{сл} > 10$ коэффициент прочностной ортотропии практически постоянен $k_{орт} \approx \text{const}$ и его значение стремится к единице $k_{орт} \rightarrow 1$.

Для обеспечения размерной точности СКТЗ с многослойным покрытием разработан метод уточняемого компенсирующего слоя. Основным показателем качества покрытия СКТЗ является его толщина. Для обеспечения размерной точности СКТЗ с многослойным покрытием по толщине в размерную цепь включают компенсирующее звено – уточняемый компенсирующий слой. Допуски на все звенья размерной цепи устанавливают легкодостижимые. Точность замыкающего звена размерной цепи обеспечивается уточнением компенсирующего слоя, осуществляемое его механической обработкой или за счет нанесения тонких регулирующих слоев. Предложенный метод уточняемого компенсирующего слоя дает точность замыкающего звена размерной цепи, соответствующую 12-14 качеству. Соответственно разработаны две методики:

— методика обеспечения размерной точности СКТЗ с многослойным покрытием с помощью уточняемого механической обработкой компенсирующего слоя;

— методика обеспечения размерной точности СКТЗ с многослойным покрытием с помощью уточняемого регулирующими слоями компенсирующего слоя.

В четвертой главе разработана концепция применения сверхзвукового газодинамического напыления при многоструйной подаче газа для формирования качественных многослойных покрытий СКТЗ.

Проведен анализ оборудования для газодинамического распыления жидкостей (композиций). В факеле распыления под силовым воздействием газа последовательно происходят: дробление струй композиций на первичные капли со средним диаметром $d_{пк}$; дробление первичных капель на вторичные капли со средним диаметром $d_{вк}$; перемешивание вторичных капель между собой; гомогенизация – равномерное распределение капель по поперечному сечению факела распыления.

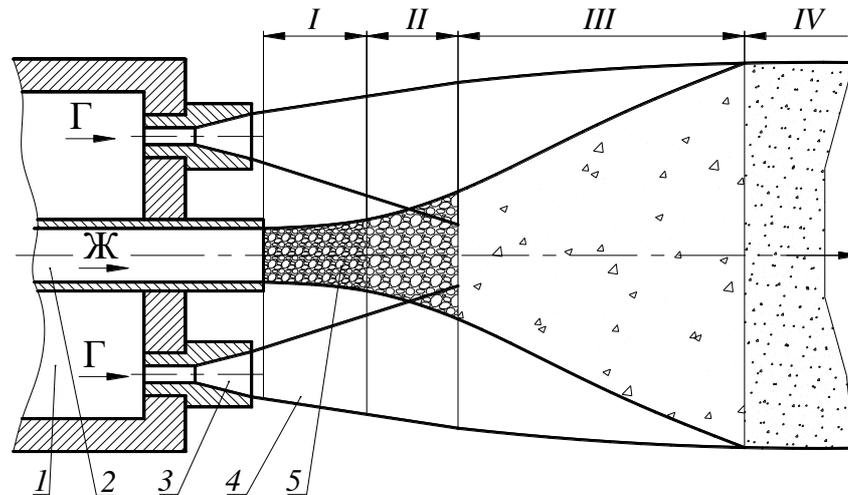


Рис. 5. Структура факела распыления при многоструйной подаче газа: 1 – канал подачи газа; 2 – канал подачи жидкости; 3 – сверхзвуковое сопло; 4 – сверхзвуковая струя газа; 5 – струя жидкости; I – участок возмущения поверхности струи жидкости; II – участок каплеобразования; III – участок формирования двухфазной струи; IV – участок стабилизации двухфазной струи. Г – газ; Ж – жидкость

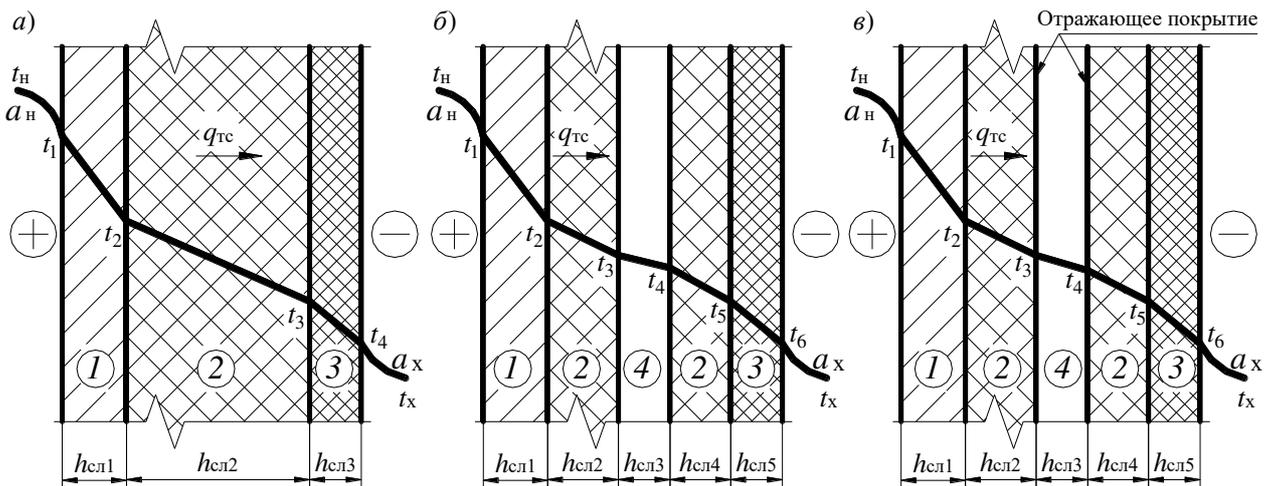


Рис. 6. Теплоизолированная плоская стенка: а – многослойная теплоизоляция без воздушной прослойки; б – многослойная теплоизоляция с воздушной прослойкой; в – многослойная теплоизоляция с воздушной прослойкой и с отражающим покрытием; 1 – металлическая стенка оборудования; 2 – теплоизоляция; 3 – наружная оболочка; 4 – воздушная прослойка; t_i – температура на нагретой поверхности i -го слоя конструкции плоской стенки; $h_{слi}$ – толщина i -го слоя конструкции плоской стенки; a_n , a_x – коэффициент теплоотдачи нагретой и холодной поверхности теплоизолированной стенки; t_n , t_x – температура среды со стороны нагретой и холодной поверхности теплоизолированной стенки; $q_{тс}$ – поверхностная плотность теплового потока через теплоизолированную плоскую стенку

Для повышения дисперсности капель распыляемой композиции применены составные сверхзвуковые струи, характеризующиеся развитой системой скачков уплотнения. Поэтому узел распыления рационально скомпоновать из большого числа одинаковых сверхзвуковых сопел, расположенных близко друг к другу, и охватывающих канал подачи жидкости. Целесообразна круговая компоновка узла распыления, то есть сверхзвуковые сопла расположены по окружности вокруг канала подачи жидкости (рис. 5).

Таблица 1

Результаты расчета термического сопротивления четырех вариантов конструкций пятислойной плоской стенки одинаковой толщины

№ конструкции	Температура на нагретой поверхности, °С	Характеристика слоев конструкции					Температура на холодной поверхности, °С
		Слой 1	Слой 2	Слой 3	Слой 4	Слой 5	
1	70	Материал: сталь $h_{сл}=0,01м$; $\lambda_{сл}=46Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Материал: керамзит $h_{сл}=0,02м$; $\lambda_{сл}=0,12Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Материал: керамзит $h_{сл}=0,02м$; $\lambda_{сл}=0,12Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Материал: керамзит $h_{сл}=0,02м$; $\lambda_{сл}=0,12Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Материал: полиэтилен $h_{сл}=0,005м$; $\lambda_{сл}=0,32Вт/(м \cdot ^\circ C)$	39
2	150	Материал: сталь $h_{сл}=0,01м$; $\lambda_{сл}=46Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Материал: ППУ $h_{сл}=0,02м$; $\lambda_{сл}=0,03Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Материал: ППУ $h_{сл}=0,02м$; $\lambda_{сл}=0,03Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Материал: ППУ $h_{сл}=0,02м$; $\lambda_{сл}=0,03Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Материал: полиэтилен $h_{сл}=0,005м$; $\lambda_{сл}=0,32Вт/(м \cdot ^\circ C)$	29
3	70	Материал: сталь $h_{сл}=0,01м$; $\lambda_{сл}=46Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Материал: керамзит $h_{сл}=0,02м$; $\lambda_{сл}=0,12Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Материал: воздух $h_{сл}=0,02м$; $\lambda_{сл}=0,028Вт/(м \cdot ^\circ C)$; $C_{хпвп}=C_{нпвп}=5Вт/(м^2 \cdot K^4)$	Материал: керамзит $h_{сл}=0,02м$; $\lambda_{сл}=0,12Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Материал: полиэтилен $h_{сл}=0,005м$; $\lambda_{сл}=0,32Вт/(м \cdot ^\circ C)$	41,2
4	70	Материал: сталь $h_{сл}=0,01м$; $\lambda_{сл}=46Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Материал: керамзит $h_{сл}=0,02м$; $\lambda_{сл}=0,12Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Материал: воздух $h_{сл}=0,02м$; $\lambda_{сл}=0,028Вт/(м \cdot ^\circ C)$; $C_{хпвп}=C_{нпвп}=2,5Вт/(м^2 \cdot K^4)$	Материал: керамзит $h_{сл}=0,02м$; $\lambda_{сл}=0,12Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Материал: полиэтилен $h_{сл}=0,005м$; $\lambda_{сл}=0,32Вт/(м \cdot ^\circ C)$	30,2

$h_{сли}$ – толщина i -го слоя конструкции стенки, м;

$\lambda_{сли}$ – коэффициент теплопроводности материала i -го слоя конструкции стенки, Вт/(м·°С);

$C_{хпвп}$, $C_{нпвп}$ – коэффициент излучения холодной поверхности воздушной прослойки, нагретой поверхности воздушной прослойки, соответственно, Вт/(м²·K⁴).

Проведено сравнение термического сопротивления конструкции многослойной плоской стенки, имеющую одинаковую толщину, но различный состав слоев (рис. 6). Целью расчета является получение температуры на холодной поверхности плоской стенки. Расчет термического сопротивления конструкции проведен для четырех вариантов пятислойной плоской стенки одинаковой толщины: №1 без воздушной прослойки с высоким коэффициентом теплопроводности теплоизоляции (рис. 6, а); №2 без воздушной прослойки с низким коэффициентом теплопроводности теплоизоляции (рис. 6, а); №3 с воздушной прослойкой без отражающего покрытия (рис. 6, б); №4 с воздушной прослойкой и с отражающим покрытием (рис. 6, в). Для

всех вариантов поверхностная плотность теплового потока через плоскую стенку составляет $q_{тс}=60\text{Вт/м}^2$. Суммарная толщина многослойной плоской стенки составляет 0,075м (табл. 1).

Анализ показывает, что при одинаковой толщине конструкции эффективны теплоизоляционные ГНПМ с низким коэффициентом теплопроводности, в частности пенополиуретан (ППУ). Область применения большинства ГНПМ ограничена рабочей температурой, не превышающей 150-200°C. Поэтому применение ГНПМ эффективно в СКТЗ, имеющих максимальную температуру нагретой поверхности 150-200°C. В СКТЗ из материалов с высоким коэффициентом теплопроводности рационально предусматривать воздушные прослойки, которые оказывают существенное сопротивление тепловому потоку. Применение отражающих покрытий на поверхностях воздушной прослойки эффективно снижает теплопередачу излучением.

Рассмотрено влияние структуры ГНПМ на теплопроводность и прочность покрытия СКТЗ. Рациональным соотношением теплоизоляционных и прочностных свойств обладает однородная структура ГНПМ, состоящая из близких по размерам небольших замкнутых пор, разделенных тонкими прослойками.

Предложены перспективные технические решения СКТЗ с интегральными теплоизоляционными элементами из ГНПМ и отражающими покрытиями. Обосновано, что послойное напыление интегрального теплоизоляционного элемента из ГНПМ устраняет полностью или значительно сокращает его механическую обработку для обеспечения размерной точности крупногабаритных СКТЗ.

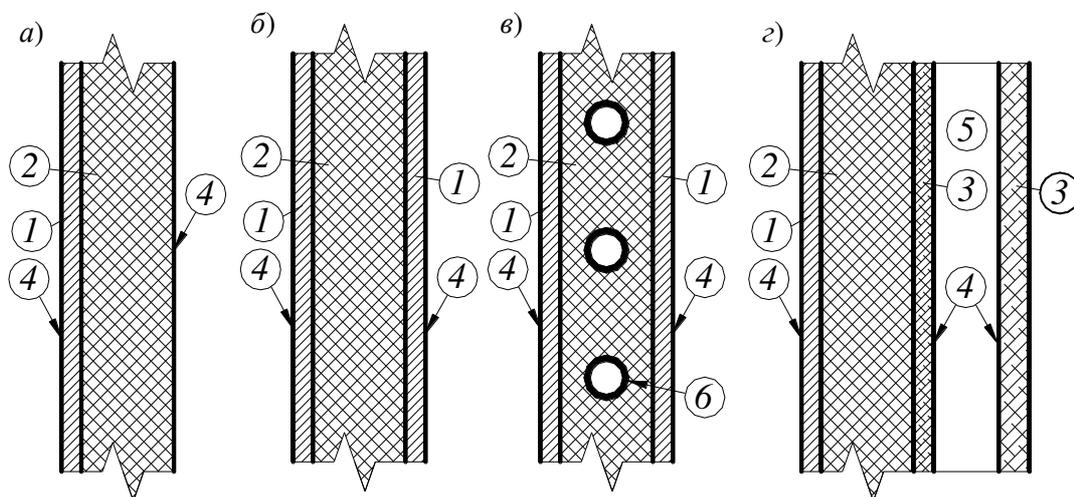


Рис. 7. Теплозащитные конструкции, выполненные с применением напыления: а – металлический лист, подкрепленный напыленным интегральным теплоизоляционным элементом; б – многослойный экран с напыленным интегральным теплоизоляционным элементом; в – многослойный экран с напыленным интегральным теплоизоляционным элементом, содержащим теплоотводящие каналы; з – многослойная перегородка с напыленным интегральным теплоизоляционным элементом и воздушной прослойкой; 1 – металлический лист; 2 – интегральный теплоизоляционный элемент; 3 – древесноволокнистая плита или фанера; 4 – напыленное отражающее покрытие; 5 – воздушная прослойка; 6 – теплоотводящие каналы охлаждающей жидкости

Для обеспечения благоприятного микроклимата на рабочих местах эффективно применять СКТЗ реализующие сразу несколько способов локализации тепла:

телопоглощение, теплоотражение, теплоотвод (рис. 7).

Послойное напыление позволяет формировать теплозащитный элемент любой толщины и конфигурации. Использование напыления делает теплозащитную конструкцию простой, а ее изготовление технологичным, так как отсутствуют элементы крепления теплоизоляции и сборочные операции по их пригонке и установке (рис. 7). СКТЗ с интегральным теплоизоляционным элементом из ГНПМ имеет минимальную толщину при высоком термическом сопротивлении. В интегральном элементе из ГНПМ могут быть установлены каналы охлаждающей жидкости. Теплоотводящие каналы выполнены из гибких металлических или полимерных трубок и равномерно расположены по площади теплозащитной конструкции, по ним прокачивается жидкость, которая осуществляет теплосъем. Теплоотводящие каналы в СКТЗ в несколько раз повышают эффективность локализации тепловых потоков.

Часто поверхности узлов и агрегатов оборудования, технологических установок в процессе работы нагреваются до температуры выше 45°C. Для исключения травм и ожогов у персонала требуется теплоизоляция таких поверхностей, при этом тепловые условия работы оборудования не должны ухудшаться. Нагретые до высокой температуры поверхности оборудования могут быть закрыты теплозащитным кожухом с напыленным интегральным теплоизоляционным элементом из ГНПМ.

Таким образом, применение различных технических решений теплоизоляции и теплозащитных конструкций (перегородок, экранов и кожухов) с интегральными теплоизоляционными элементами из ГНПМ и отражающими покрытиями способствует обеспечению комфортных условий труда работников машиностроения.

Характеризующие сверхзвуковое газодинамическое распыление параметры: диаметр канала подачи жидкости $d_{кж}$; число сверхзвуковых сопел подачи газа N_c ; число Маха на срезе сопла M_a являются технологическими параметрами, они определяют режим напыления и показатели качества напыленного покрытия.

Выделена причинно-следственная связь (закономерность) между вероятностью отказа по k -ому показателю качества покрытия $V_{котк}$ при применении сверхзвукового газодинамического напыления с заданными технологическими параметрами: $V_{котк} = f(g_{деф}) = f(d_{вк}) = f(d_{кж}; N_c; M_a)$.

Обоснована причинно-следственная связь «технологические параметры распыления композиции (жидкости) → дисперсность капель → однородность напыленной смеси → дефектность (качество) отвержденного покрытия → вероятность отказа покрытия» реализуемая при сверхзвуковом газодинамическом напылении с многоструйной подаче газа.

В пятой главе проведено экспериментальное исследование влияния технологических параметров сверхзвукового газодинамического напыления многослойных покрытий при многоструйной подаче газа на показатели качества и на

дисперсность распыленных капель. В экспериментах проведено исследование отражающих и теплоизоляционных покрытий.

Программа экспериментальных исследований разделена на два этапа.

На первом этапе на основе полного факторного эксперимента 2^3 (табл. 2) были получены экспериментальные модели в виде степенных зависимостей, которые показывают влияние технологических параметров на дисперсность образующихся при сверхзвуковом газодинамическом распылении капель композиции (жидкости) и на значения показателей качества напыленных многослойных покрытий.

Таблица 2

№ опыта	Кодированные значения								Натуральные значения		
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$	M_a	$d_{кж}, \text{м}$	$N_c, \text{шт}$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	1,5	$0,8 \cdot 10^{-3}$	8
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	3,0	$0,8 \cdot 10^{-3}$	8
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	1,5	$3,2 \cdot 10^{-3}$	8
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	3,0	$3,2 \cdot 10^{-3}$	8
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	1,5	$0,8 \cdot 10^{-3}$	20
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	3,0	$0,8 \cdot 10^{-3}$	20
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	1,5	$3,2 \cdot 10^{-3}$	20
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	3,0	$3,2 \cdot 10^{-3}$	20

Зависимость параметра качества покрытия от технологических параметров сверхзвукового газодинамического напыления при многоструйной подаче газа представлена степенным уравнением регрессии: $x_k = k_0 \cdot (M_a)^{k_1} \cdot (d_{кж})^{k_2} \cdot (N_c)^{k_3}$, где k_0, k_1, k_2, k_3 – эмпирические коэффициенты; x_k – показатель качества покрытия.

На втором этапе по значениям показателей качества покрытия, полученным при определенных технологических параметрах, оценивали вероятность отказа покрытия. При оценке вероятности отказа покрытия по определенному показателю качества из трех технологических параметров сверхзвукового газодинамического напыления ($M_a, d_{кж}, N_c$) варьировался только диаметр канала подачи жидкости $d_{кж}$.

1. Проведено экспериментальное исследование влияния технологических параметров сверхзвукового газодинамического напыления при многоструйной подаче газа на дисперсность распыленных капель и на показатели качества многослойного отражающего покрытия.

1.1. *Краткая характеристика экспериментального оборудования и испытываемых образцов.* Для эксперимента был изготовлен узел распыления со сменным многосопловым блоком (рис. 8). В экспериментах использовался многосопловой блок с кольцевой компоновкой, в который может быть установлено до 20 сверхзвуковых сопел $N_c=20$. В канал подачи жидкости устанавливаются сменные вставки, имеющие диаметр $d_{кж}=0,8; 1,2; 1,6; 2,0; 2,4; 2,8; 3,2$ мм. Были изготовлены 7 наборов сверхзвуковых сопел, отличающихся числом Маха на срезе сопла $M_a=1,5; 1,75; 2,0; 2,25; 2,5; 2,75; 3,0$. Диаметр критического сечения у всех сопел $d_{кр}=1$ мм. При меньшем количестве сверхзвуковых сопел ($N_c < 20$) в

многосопловом блоке, сопла распределяются равномерно по окружности, а в оставшиеся отверстия устанавливаются винты-заглушки. Таким образом, в эксперименте задается конкретный технологический режим, характеризуемый тремя параметрами: диаметр канала подачи жидкости $d_{\text{жж}}$, число сверхзвуковых сопел N_c ; число Маха на срезе сопел M_a . В узел распыления газ (воздух) и жидкость (композиция) подавались под давлением, соответствующим конкретному режиму.

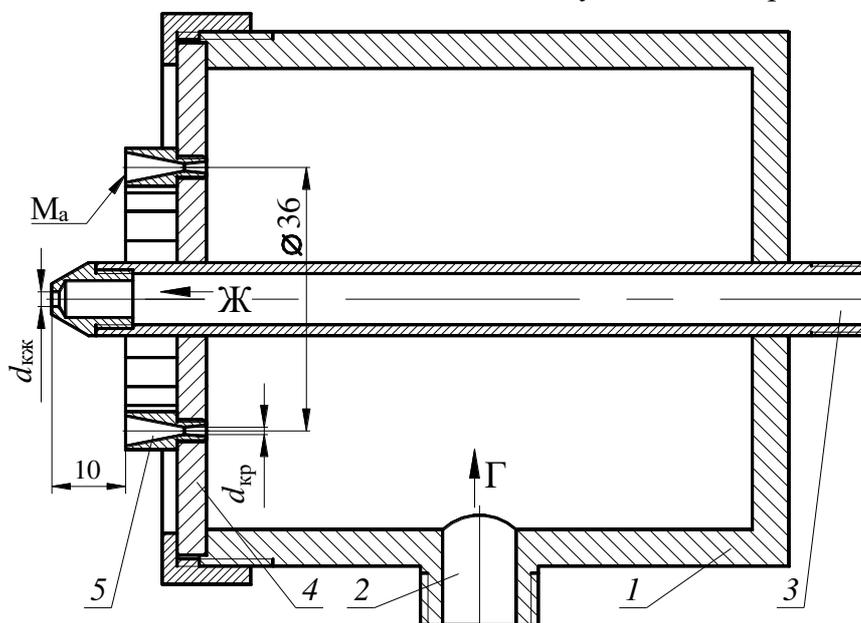


Рис. 8. Узел распыления со сменным многосопловым блоком: $d_{\text{жж}}$ – диаметр канала подачи жидкости; $d_{\text{кр}}$ – диаметр критического сечения сопла; M_a – число Маха на срезе сопел; Γ – газ; Ж – жидкость; 1 – корпус узла распыления; 2 – канал подачи газа; 3 – канал подачи жидкости; 4 – сменный сопловый блок; 5 – сверхзвуковое сопло

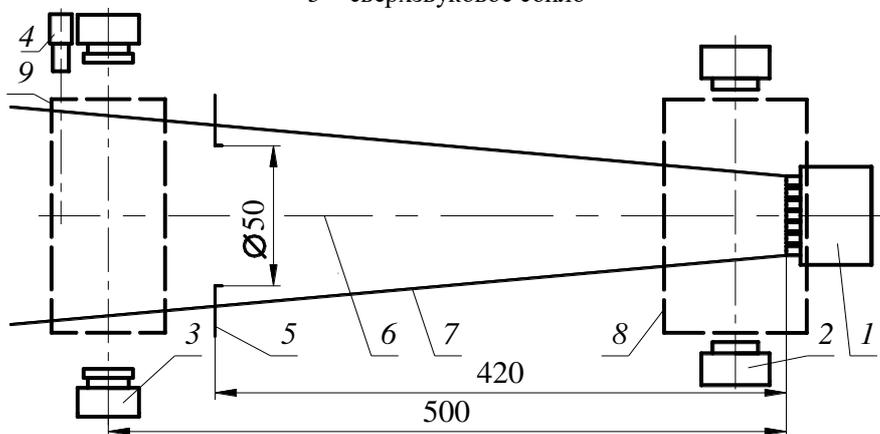


Рис. 9. Схема визуализации сверхзвукового факела распыления, капель и определения размеров распыленных капель (вид сверху): 1 – узел распыления; 2 – ИАБ-451 с фотоаппаратом для визуализации факела распыления; 3 – лазерный дифракционный анализатор; 4 – фотоаппарат для визуализации капель; 5 – экран с отверстием; 6 – ось факела распыления; 7 – граница факела распыления; 8 – область фотографирования факела распыления; 9 – область измерения и фотографирования капель

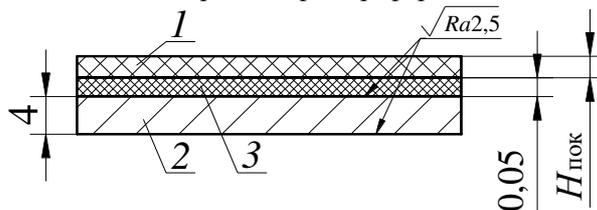


Рис. 10. Образец с напыленным многослойным покрытием на полиэтилентерефталатную (ПЭТ) пленку; 1 – покрытие; 2 – стальная пластина; 3 – ПЭТ пленка

Исследован факел распыления (рис. 9). Визуализация сверхзвукового факела распыления при взаимодействии струи жидкости и составной сверхзвуковой струи газа проводилась в области, расположенной перед узлом распыления с помощью оптического прибора ИАБ-451. Для визуализации распыленных капель применялась цифровая камера ВИДЕОСКАН-11002-2001 разрешением 4004x2671 (пикселей) с объективом Micro-Nikkor 200мм. Для определения размеров распыленных капель применен лазерный дифракционный анализатор фирмы «MALVERN», размер частиц выражается в виде диаметра сферы эквивалентного объема.

Образец для испытаний представляет собой покрытие, напыленное на полиэтилентерефталатную (ПЭТ) пленку, которая является разделительным материалом между покрытием и стальной пластиной (рис. 10). После отверждения напыленное покрытие отделялось от ПЭТ пленки.

Применялись две схемы напыления покрытия.

Схема 1. Технологические параметры $M_a = \text{const}$, $d_{\text{кж}} = \text{const}$, $N_c = \text{const}$. Изменялось число единичных слоев $N_{\text{сл}}$ при постоянной толщине единичного слоя $H_c = \text{const}$, то есть увеличивалась толщина покрытия $H_{\text{пок}} = N_{\text{сл}} \cdot H_c$.

Схема 2. Технологические параметры $M_a = \text{const}$, $N_c = \text{const}$. Толщина покрытия постоянна $H_{\text{пок}} = N_{\text{сл}} \cdot H_c = \text{const}$, для выполнения этого условия числу единичных слоев $N_{\text{сл}}$ соответствует определенная толщина единичного слоя H_c , обусловленная диаметром канала подачи $d_{\text{кж}}$.

Испытания образцов по определению предела прочности напыленного многослойного отражающего покрытия при отрыве от подложки проводились по ГОСТ 32299-2013, а при растяжении по ГОСТ 18299-72.

1.2. *Получены экспериментальные модели влияния технологических параметров сверхзвукового газодинамического напыления при многоструйной подаче газа на диаметр вторичных капель и на прочность отражающего покрытия при отрыве от подложки и растяжении.*

По результатам проведенного полного факторного эксперимента получены следующие модели: $d_{\text{вк}} = 19850 \cdot (M_a)^{-1,018} \cdot (d_{\text{кж}})^{0,344} \cdot (N_c)^{-0,590}$, где $d_{\text{вк}}$ – средний диаметр вторичных капель, мкм; $\sigma_{\text{пред_от}} = 0,879 \cdot (M_a)^{0,204} \cdot (d_{\text{кж}})^{-0,140} \cdot (N_c)^{0,191}$, где $\sigma_{\text{пред_от}}$ – предельная прочность покрытия при отрыве от подложки, МПа; $\sigma_{\text{пред_рас}} = 1,042 \cdot (M_a)^{0,210} \cdot (d_{\text{кж}})^{-0,144} \cdot (N_c)^{0,198}$, где $\sigma_{\text{пред_рас}}$ – предельная прочность покрытия при растяжении, МПа.

1.3. *Проведено исследование влияния числа и толщины единичных слоев на прочность многослойного отражающего покрытия и на вероятность его отказа при отрыве от подложки и растяжении.*

При отрыве от подложки образцов, изготовленных по схеме 1, изменялось число единичных слоев $N_{\text{сл}} = 2, 3, 4, 5, 9, 16, 32$, при постоянных технологических параметрах напыления $M_a = 1,5$, $d_{\text{кж}} = 0,8$ мм, $N_c = 8$. Для образцов, изготовленных по

схеме 2, были заданы постоянные технологические параметры $M_a=1,5$; $N_c=8$ и задана толщина покрытия $H_{\text{пок}}=\text{const}=2,2\pm 0,2\text{мм}$ (рис. 11). При минимальной допускаемой предельной прочности при отрыве от подложки $3,3\text{МПа}$ у покрытия, изготовленного по схеме 1, при увеличении числа слоев с 2 до 32 вероятность отказа возрастает с 0,0071 до 0,8786, а изготовленного по схеме 2 – уменьшается с 0,8341 до 0,0981.

Ошибка! Ошибка связи.

Рис. 11. Зависимость предельной прочности при отрыве от подложки отражающего покрытия от числа слоев, изготовленных по схемам 1 и 2

Ошибка! Ошибка связи.

Рис. 12. Зависимость предельной прочности при растяжении отражающего покрытия от числа слоев, изготовленных по схемам 1 и 2

При растяжении образцов, изготовленных по схеме 1, изменялось число единичных слоев $N_{\text{сл}}=2, 3, 4, 5, 9, 16, 32$, при постоянных технологических параметрах напыления $M_a=1,5$, $d_{\text{жк}}=0,8\text{мм}$, $N_c=8$. Для образцов, изготовленных по схеме 2, были заданы постоянные технологические параметры $M_a=1,5$; $N_c=8$ и задана толщина покрытия $H_{\text{пок}}=\text{const}=2,2\pm 0,2\text{мм}$ (рис. 12). При минимальной допускаемой предельной прочности при растяжении $4,3\text{МПа}$ у покрытия, изготовленного по схеме 1, при увеличении числа слоев с 2 до 32 вероятность отказа снижается с 0,0762 до 0,0065, а изготовленного по схеме 2 – уменьшается с 0,9887 до 0.

Повышение прочности единичного слоя при уменьшении его толщины объясняется снижением размеров дефектов и их количества в единичном слое, а также повышением однородности напыленной смеси, обусловленной размерами вторичных капель. Также с увеличением числа слоев и уменьшением их толщины существенно снижается вероятность отказа покрытия по прочности. То есть наблюдается влияние масштабного эффекта, заключающегося в изменении свойств реальных образцов покрытия с дефектами в зависимости от их линейных размеров.

2. Проведено экспериментальное исследование влияния технологических параметров сверхзвукового напыления при многоструйной подаче газа на дисперсность капель и на показатели качества многослойного теплозащитного покрытия.

2.1. Краткая характеристика экспериментального оборудования и испытываемых образцов. Для сверхзвукового газодинамического напыления ППУ использовался узел распыления со сменным многосопловым блоком, такой же, как для напыления отражающего покрытия (рис. 8). При напылении ППУ по каналу подачи жидкости подают предварительно перемешанные в заданной пропорции полиольную композицию «А» и полиизоцианатную композицию «Б».

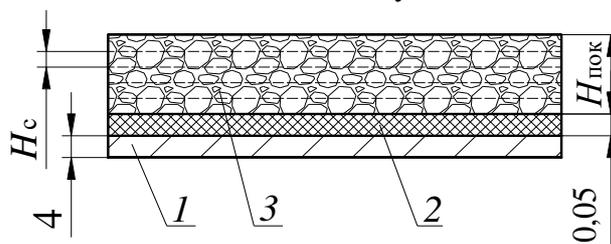


Рис. 13. Образец с напыленным на полиэтилентерефталатную (ПЭТ) пленку ППУ: 1 – стальная пластина; 2 – ПЭТ-пленка; 3 – напыленный ППУ

Образец для испытаний представляет собой вспененное пенополиуретановое покрытие, напыленное на полиэтилентерефталатную (ПЭТ) пленку, которая является разделительным материалом между покрытием и стальной пластиной (рис. 13). После отверждения напыленное покрытие отделялось от ПЭТ пленки.

Многослойные образцы пенополиуретанового покрытия имели постоянную толщину $H_{\text{пок}}=N_{\text{сл}} \cdot H_{\text{с}}=\text{const}=67\pm 10\text{мм}$. Для выполнения этого условия числу единичных слоев $N_{\text{сл}}$ соответствует определенная толщина единичного слоя $H_{\text{с}}$, зависящая от диаметра канала подачи $d_{\text{кж}}$.

2.2. Получены экспериментальные модели влияния технологических параметров сверхзвукового газодинамического напыления при многоструйной подаче газа на диаметр вторичных капель и на показатели качества пенополиуретанового покрытия

По результатам проведенного полного факторного эксперимента получены следующие модели: $d_{\text{вк}} = 29050 \cdot (M_a)^{-0,844} \cdot (d_{\text{кж}})^{0,4165} \cdot (N_c)^{-0,6350}$, $d_{\text{вк}}$ – средний диаметр вторичных капель, мкм; $\rho_{\text{ППУ}} = 34,8850 \cdot (M_a)^{0,0642} \cdot (d_{\text{кж}})^{-0,041} \cdot (N_c)^{0,0434}$, где $\rho_{\text{ППУ}}$ – плотность ППУ, кг/м³; $\sigma_{\text{сж}10\%} = 0,2749 \cdot (M_a)^{0,0631} \cdot (d_{\text{кж}})^{-0,0500} \cdot (N_c)^{0,0491}$, где $\sigma_{\text{сж}10\%}$ – прочность ППУ при 10%-ной относительной деформации сжатия, МПа; $\sigma_{\text{изг}} = 0,3238 \cdot (M_a)^{0,054} \cdot (d_{\text{кж}})^{-0,049} \cdot (N_c)^{0,0456}$, где $\sigma_{\text{изг}}$ – предел прочности ППУ при поперечном изгибе, МПа; $\lambda_{\text{ППУ}} = 0,0174 \cdot (M_a)^{0,0634} \cdot (d_{\text{кж}})^{-0,051} \cdot (N_c)^{0,0418}$, где $\lambda_{\text{ППУ}}$ – теплопроводность ППУ, Вт/(м·°К); $W = 56,2990 \cdot (M_a)^{-0,5450} \cdot (d_{\text{кж}})^{0,2667} \cdot (N_c)^{-0,4080}$, где W – водопоглощение ППУ, %.

2.3. Проведено исследование влияния технологических параметров сверхзвукового газодинамического напыления при многоструйной подаче газа на показатели качества пенополиуретанового покрытия и вероятность его отказа.

2.3.1. Плотность ППУ. Определение плотности ППУ осуществляли по ГОСТ 409-2017 измерением объема образца и его массы. Образцы вырезали из плит ППУ, напыленных при постоянных технологических параметрах $M_a=1,75$; $N_c=18$ и заданной толщине покрытия $H_{\text{пок}}=N_{\text{сл}} \cdot H_{\text{с}}=\text{const}=67\pm 10\text{мм}$. При увеличении числа единичных слоев $N_{\text{сл}}$ с 2 до 16 и соответственно уменьшении их толщины $H_{\text{с}}$ наблюдается повышение плотности ППУ, а следовательно, рост вероятности отказа по плотности. Плотность покрытия из 16 слоев выше на 4,1%, чем такого же покрытия из 2 слоев.

2.3.2. Водопоглощение ППУ. Определение водопоглощения ППУ осуществлялось по ГОСТ 20869-75. Образцы вырезали из плит ППУ, напыленных при постоянных технологических параметрах $M_a=2,0$; $N_c=10$ и заданной толщине покрытия $H_{\text{пок}}=N_{\text{сл}} \cdot H_{\text{с}}=\text{const}=67\pm 10\text{мм}$. При увеличении числа единичных слоев $N_{\text{сл}}$ с 2 до 16 и соответственно уменьшении их толщины $H_{\text{с}}$ наблюдается уменьшение водопоглощения ППУ, а следовательно, снижение вероятности отказа по

водопоглощению. Водопоглощение покрытия из 16 слоев ниже на 23%, чем такого же покрытия из 2 слоев.

2.3.3. *Теплопроводность ППУ.* Определение теплопроводности ППУ проводилось методом стационарного теплового потока по ГОСТ 7076-99. Образцы вырезали из плит ППУ, напыленных при постоянных технологических параметрах $M_a=2,5$; $N_c=14$ и заданной толщине покрытия $H_{\text{пок}}=N_{\text{сл}} \cdot H_c = \text{const} = 67 \pm 10$ мм. При увеличении числа единичных слоев $N_{\text{сл}}$ с 2 до 16 и соответственно уменьшении их толщины H_c наблюдается повышение теплопроводности ППУ, а следовательно, повышение вероятности отказа по теплопроводности. Теплопроводность покрытия из 16 слоев выше на 5%, чем такого же покрытия из 2 слоев.

2.3.4. *Прочность ППУ.* Определение предела прочности ППУ при поперечном изгибе осуществляли по ГОСТ 18564-2017 и на сжатие по ГОСТ 23206-2017. Образцы вырезали из плит ППУ, напыленных при постоянных технологических параметрах $M_a=2,75$; $N_c=8$ для испытаний на сжатие и $M_a=2,25$; $N_c=12$ для испытаний на изгиб, толщина покрытия $H_{\text{пок}}=N_{\text{сл}} \cdot H_c = \text{const} = 67 \pm 10$ мм. При увеличении числа единичных слоев $N_{\text{сл}}$ с 2 до 16 и соответственно уменьшении их толщины H_c наблюдается повышение прочности ППУ на сжатие и на изгиб, а следовательно, снижение вероятности отказа по прочности при сжатии и при изгибе. Прочность при сжатии покрытия из 16 слоев выше на 5,1%, чем такого же покрытия из 2 слоев. Прочность при изгибе покрытия из 16 слоев выше на 4,9%, чем такого же покрытия из 2 слоев.

3. Экспериментально апробирован метод уточняемого компенсирующего слоя для формирования сверхзвуковым газодинамическим напылением многослойного покрытия ППУ заданной размерной точности по толщине. Пенополиуретановое покрытие состояло из четырех единичных слоев с размерами $h_{c1}=h_{c2}=h_{c3}=h_{c4}=25_{-5}$ мм и компенсирующего слоя $h_{kc}=15_{-4}$ мм. Толщина покрытия является замыкающим звеном размерной цепи $A_{\Delta}=115_{-5}$ мм. Для учета погрешностей возникших при напылении назначен уточняемый компенсирующий слой $h_{kc}=15_{-4}$ мм, который наносится последним. Для достижения заданной толщины уточнение компенсирующего слоя проводилось механической обработкой и регулируемыми слоями. Примененные методики обеспечили заданную размерную точность толщины покрытия.

В шестой главе показано применение СКТЗ с напыленными многослойными покрытиями для улучшения условий труда и повышения безопасности работников машиностроительных предприятий.

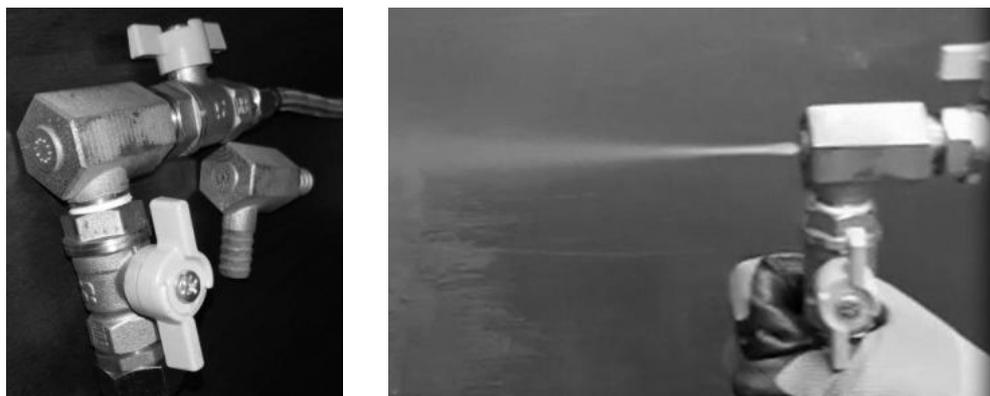


Рис. 14. Монолитный узел распыления с кольцевой компоновкой сопел: узел распыления с присоединенными шлангами подачи распыляемой композиции и распыляющего газа (слева); напыление композиции из монолитного узла распыления (справа)

Были разработаны и напечатаны на 3D-принтере методом селективного лазерного плавления из порошка нержавеющей стали 07X18H12M2 монолитные сверхзвуковые газодинамические узлы распыления с многоструйной подачей газа (рис. 14). Применение аддитивных технологий обеспечивает высокое конструктивно-технологическое совершенство узлов распыления.

Предложены технические решения СКТЗ с напыленными интегральными теплоизоляционными и отражающими многослойными покрытиями.



Рис. 15. Напыленная интегральная пенополиуретановая теплоизоляция трубопроводов (слева); напыление на поверхность теплоизоляции отражающего лакокрасочного покрытия (справа)

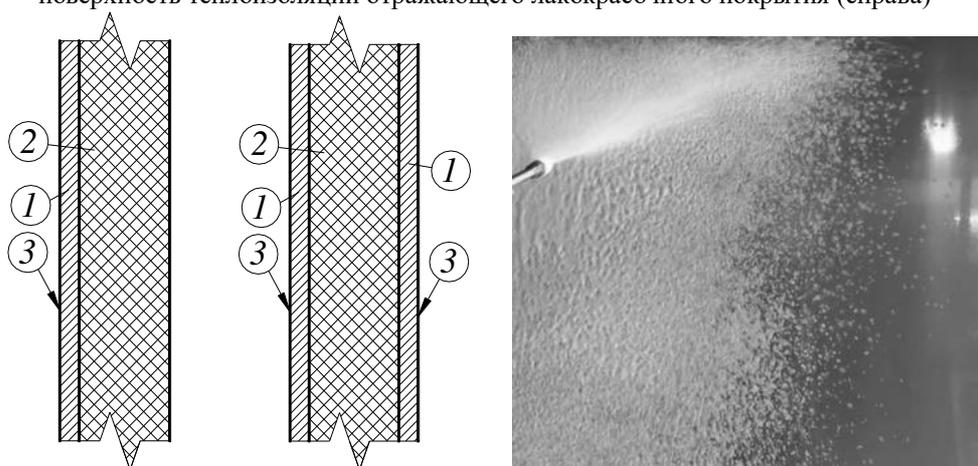


Рис. 16. Теплозащитные панели с теплоизоляционным интегральным элементом, выполненным напылением пенополиуретана: сечения теплозащитной панели (слева, в центре): фото металлического листа с напыляемым интегральным теплоизоляционным элементом (справа); 1 – металлический лист; 2 – интегральный теплоизоляционный элемент; 3 – напыленное отражающее покрытие



Рис. 17. Теплозащитная трехслойная панель с теплоизоляционным интегральным наполнителем, выполненным напылением пенополиуретана, и теплопроводящими каналами: сечение теплозащитной трехслойной панели с теплопроводящими каналами (слева); фото теплозащитной трехслойной панели с теплопроводящей трубкой (справа); 1 – металлический лист; 2 – интегральный теплоизоляционный элемент (заполнитель); 3 – напыленное отражающее покрытие; 4 – теплопроводящие каналы

Теплоизоляция. Напылением интегральных многослойных покрытий формируют теплоизоляцию поверхностей оборудования, трубопроводов и воздухопроводов. Послойно напыляют интегральные теплоизоляционные элементы любой толщины и конфигурации. Для защиты от внешних воздействий на теплоизоляцию рационально послойным напылением наносить отражающие покрытия (рис. 15).

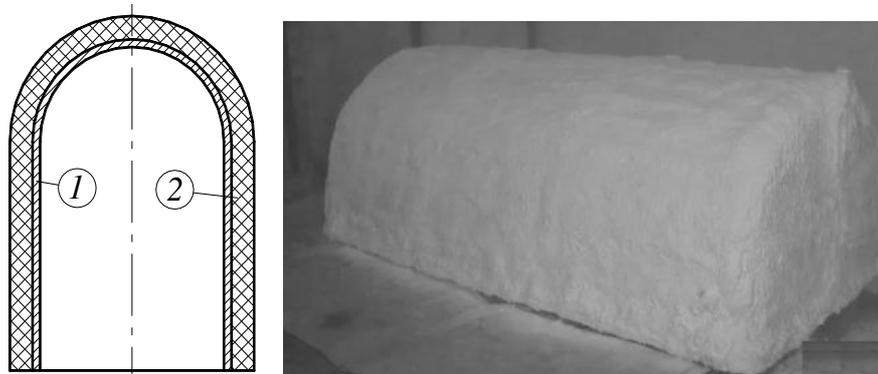


Рис. 18. Теплозащитный кожух с напыленным интегральным теплоизоляционным элементом из пенополиуретана: сечение теплозащитного кожуха (слева); фото теплозащитного кожуха (справа); 1 – металлический каркас; 2 – интегральный теплоизоляционный элемент

Теплозащитные конструкции. Интегральные теплопоглощающие элементы из ГНПМ теплозащитных конструкций (перегородок, экранов, кожухов) также могут быть получены послойным напылением (рис. 16).

Тепловое сопротивление конструкции может быть повышено в несколько раз при размещении в интегральном элементе из ГНПМ каналов с охлаждающей жидкостью, через которые отводится тепло (рис. 17). Нагретые до высокой температуры поверхности оборудования могут быть закрыты теплозащитным кожухом с напыленным интегральным теплоизоляционным элементом из пенополиуретана (рис. 18). СКТЗ с напыленными теплоизоляционными и отражающими многослойными покрытиями характеризуется простотой конструкции

и высокой технологичностью, одновременно реализуют несколько способов локализации тепловых потоков.

Предложенные в диссертации технические решения СКТЗ были применены для улучшения условий труда работников на участке термической обработки (рис. 19). Для измерений температуры поверхностей и воздуха использовался поверенный одноканальный термометр «testo 110», имеющий диапазон измерений $-50...+150^{\circ}\text{C}$ (погрешность измерения $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$). Измерения проводились в теплый период года в течение 3 часов через каждые 15 минут, при работе печей в плановом режиме.

Во время проведения технологического процесса на участке термической обработки проводились замеры температуры поверхностей перегородок в помещениях №1-4 с нагретой и холодной стороны, а также замеры температуры поверхностей на рабочих местах (поз. 11 и 13), обращенных к печам. Измерялись температуры ограждающих помещение с термическим оборудованием перегородок: $t_{\text{нп1}}$, $t_{\text{хп1}}$, $t_{\text{нп2}}$, $t_{\text{хп2}}$, $t_{\text{нп3}}$, $t_{\text{хп3}}$, $t_{\text{нп4}}$, $t_{\text{хп4}}$ – температура нагретой и холодной поверхности перегородки №1, №2, №3, №4 соответственно. Измерялись температуры поверхностей на рабочих местах (поз. 11 и 13): $t_{\text{пов1}}$, $t_{\text{пов2}}$; $t_{\text{пов3}}$ – температура поверхностей на рабочих местах. Также проводились замеры температуры поверхностей теплоизоляции трубопроводов и воздухопроводов: трубопровода горячей воды 95°C $t_{\text{тигв}}$; трубопровода холодной воды 12°C $t_{\text{тихв}}$; трубопровода пара 140°C $t_{\text{типар}}$; воздуховода нагретого воздуха $t_{\text{тинв}}$; воздуховода охлажденного воздуха $t_{\text{тиов}}$. Во время измерений температуры поверхностей также контролировалась средняя температура воздуха на участке термической обработки $t_{\text{возд}}$.

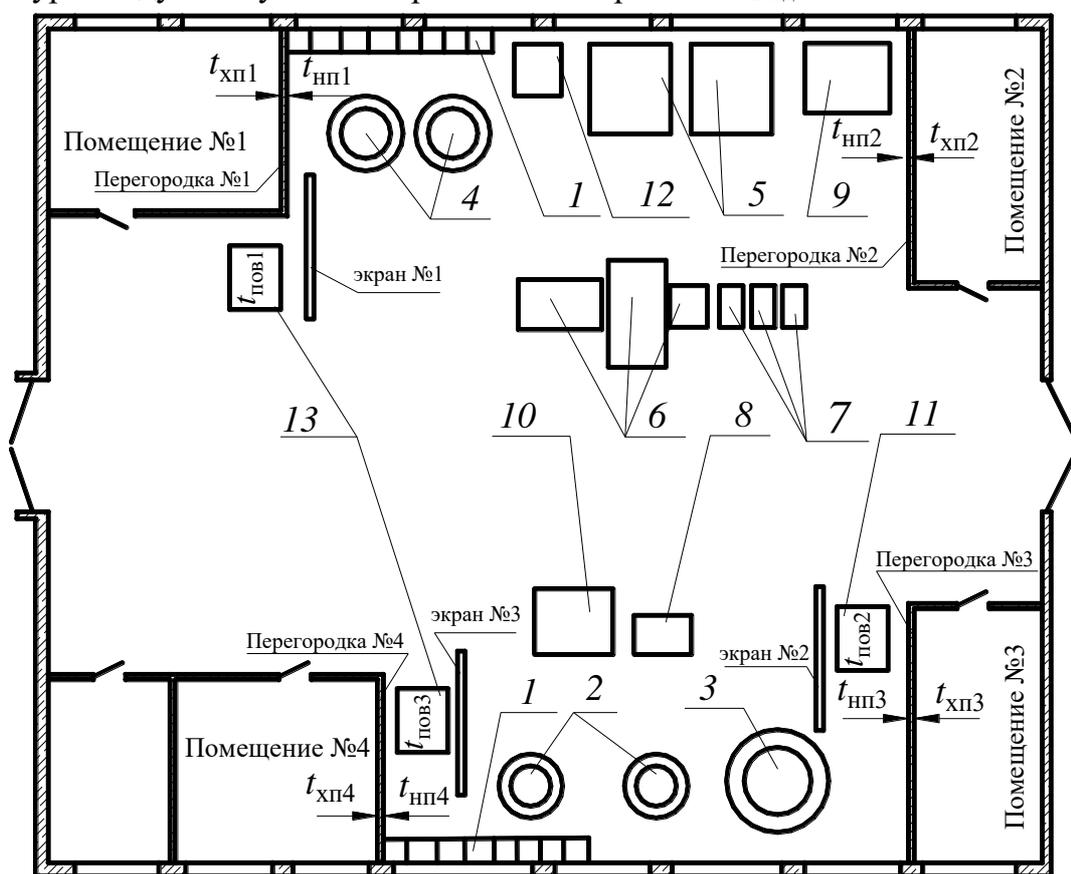


Рис. 19. План участка термической обработки: 1 – электрический щит; 2 – печь шахтная отпускная термическая ПН-32 ($t_{\text{раб}}=650^{\circ}\text{C}$); 3 - печь электрическая СЭВ-3.3; 4 – печь электрическая с защитной атмосферой СШЗ-6.6/ИЗ ($t_{\text{раб}}=700^{\circ}\text{C}$); 5 - печь электрическая шахтная цементационная СШЦМ; 6 – бак для охлаждения; 7 – закалочная ванна; 8 - печь камерная газовая СНО; 9 - высокочастотная установка ВЧИ-25; 10 - печь термическая шахтная цементационная Ц-60 А; 11 – установка дробеструйной очистки 44612; 12 - печь электрическая НГВ-6.66; 13 – оборудование очистки и подготовки заготовок

Анализ измерений показал, что температуры поверхностей перегородок и рабочих мест, а также поверхностей теплоизоляции трубопроводов горячей воды и пара, воздуховода горячего воздуха превышают допусковое значение 28°C для теплого периода года и категории работ Пб. Температура поверхностей теплоизоляции трубопровода холодной воды и воздуховода охлажденного воздуха ниже температуры воздуха в помещении. Таким образом, необходимо улучшение условий труда работников на участке термической обработки.

Для улучшения условий труда работников в помещениях №1-4 (рис. 19) со стороны холодной поверхности перегородок (изнутри помещений) напылено интегральное трехслойное пенополиуретановое покрытие толщиной 40мм, зашитое каркасом из древесноволокнистой плиты толщиной 3,2мм и фанеры толщиной 6мм (рис. 20). Между древесноволокнистой плитой и фанерой имеется воздушная прослойка толщиной 40мм. На поверхности, ограничивающие воздушную прослойку, напылена отражающая алюминиевая краска. На рабочих местах (поз. 11 и 13) для снижения температуры поверхностей рабочих мест ниже температуры 28°C установлены передвижные экраны №1-3 (рис. 19), защищающие поверхности рабочих мест от теплового излучения со стороны печей. Теплозащитные экраны выполнены в виде трехслойных оболочек толщиной 60мм, закрепленных на сварной раме (рис. 21), обшивки выполнены из алюминиевых листов толщиной 1,2мм и напыленного между ними интегрального трехслойного пенополиуретанового покрытия.



Рис. 20. Стационарная перегородка из алюминиевого листа (слева), напыленное на металлический лист интегральное пенополиуретановое покрытие, зашитое каркасом из древесноволокнистой плитой и фанеры (в центре): 1 – металлический лист с отражающей наружной поверхностью; 2 – пенополиуретан; 3 – древесноволокнистая плита; 4 – отражающая алюминиевая краска; 5 – воздушная прослойка; 6 – фанера

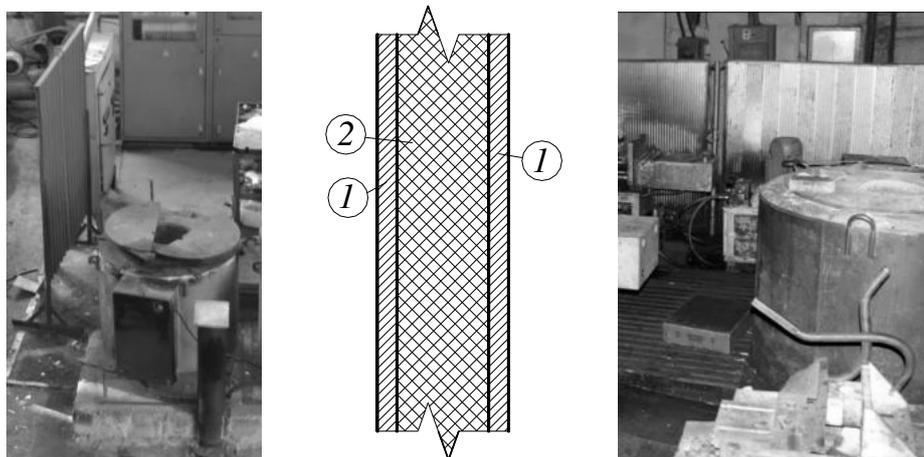


Рис. 21. Передвижные теплозащитные экраны: 1 – металлический лист с отражающей наружной поверхностью; 2 - пенополиуретан

Для обеспечения допустимой нормативами температуры поверхностей теплоизоляции трубопроводов и воздухопроводов вместо волокнистой теплоизоляции напылено многослойное интегральное пенополиуретановое покрытие: на трубопровод горячей воды 95°C наружным диаметром 325мм толщиной 40мм; на трубопровод холодной воды 12°C наружным диаметром 325мм толщиной 30мм; на трубопровод пара 140°C наружным диаметром 325мм толщиной 60мм; воздуховода нагретого воздуха 40°C сечением 500x250мм толщиной 15мм; воздуховода охлажденного воздуха 5°C сечением 500x250мм толщиной 15мм. На наружную поверхность ППУ напылено трехслойное защитное лакокрасочное покрытие.

Проведено сравнение нормативных (оптимальной и допустимой) температур поверхностей рабочих мест с температурой поверхностей до и после проведения мероприятий по улучшению условий труда работников (табл. 3). После улучшения условий труда, связанных с напылением интегральных пенополиуретановых покрытий на перегородки и установки теплозащитных экранов, как максимальная температура, так и средняя температура поверхностей перегородок и рабочих мест соответствует допустимым значениям.

Таблица 3.

Сравнение температуры поверхностей перегородок и рабочих мест на участке термической обработки до и после мероприятий по улучшению условий труда работников

Обозначение температуры поверхности	Температура поверхностей, °С					
	Оптимальная, теплый период, категория Пб	Допустимая, теплый период, категория Пб	До мероприятий по улучшению условий труда		После мероприятий по улучшению условий труда	
			Средняя	Максимальная	Средняя	Максимальная
$t_{хп1}$	18,0-22,0	15,0-28,0	28,5	33,7	26,2	26,9
$t_{хп2}$			29,1	34,8	26,1	26,7
$t_{хп3}$			26,9	31,3	25,8	26,6
$t_{хп4}$			26,7	29,9	25,7	26,5
$t_{пов1}$			29,9	35,1	26,2	26,8
$t_{пов2}$			28,0	32,8	26,2	27,2
$t_{пов3}$			27,9	31,4	26,1	27,3

Таблица 4

Сравнение температуры поверхностей теплоизоляции трубопроводов и воздухопроводов на участке термической обработки до и после мероприятий по улучшению условий труда работников

Обозначение	Температура поверхностей, °С
-------------	------------------------------

температуры поверхности	Оптимальная, теплый период, категория Пб	Допустимая, теплый период, категория Пб	До мероприятий по улучшению условий труда		После мероприятий по улучшению условий труда	
			Средняя	Максимальная или минимальная	Средняя	Максимальная или минимальная
$t_{\text{тигв}}$	18,0-22,0	15,0-28,0	31,2	32,3 max	27,4	28,4 max
$t_{\text{тихв}}$			17,1	16,4 min	24,0	23,5 min
$t_{\text{тишар}}$			33,3	34,1 max	27,5	28,1 max
$t_{\text{тинв}}$			29,9	30,3 max	26,7	27,1 max
$t_{\text{тиов}}$			22,1	21,8 min	24,2	23,7 min

Проведено сравнение нормативных (оптимальной и допустимой) температур поверхностей рабочих мест с температурой поверхностей теплоизоляции трубопроводов и воздухопроводов до и после проведения мероприятий по улучшению условий труда работников (табл. 4). После улучшения условий труда средняя температура всех поверхностей теплоизоляции трубопроводов и воздухопроводов соответствует допустимым значениям. Из-за увеличения термического сопротивления теплоизоляции трубопроводов и воздухопроводов температура ее поверхностей стала близка к температуре воздуха в помещении. Согласно СОУТ условия труда по микроклимату соответствуют 2 классу.

Основные выводы и результаты

Избыточные тепловыделения ухудшают микроклимат в цехах и помещениях машиностроительных предприятий, создают тяжелые условия труда для работников. Эффективность локализации тепловых потоков обусловлена качеством СКТЗ, их техническими и технологическими решениями.

В диссертации решена актуальная проблема: повышение качества покрытий СКТЗ за счет применения рациональных технологических параметров сверхзвукового газодинамического напыления. В диссертации доказана гипотеза: параметры технологического процесса сверхзвукового газодинамического напыления обуславливают дефектность и показатели качества покрытия СКТЗ, а следовательно, вероятность его отказа. Предложены новые научно обоснованные технические и технологические решения СКТЗ, улучшающие условия труда и обеспечивающие безопасность работников машиностроения.

Можно сделать следующие выводы, а также выделить основные теоретические и практические результаты диссертации.

1. Риск отказа покрытия СКТЗ во время эксплуатации обусловлен условиями эксплуатации, уровнем производственного контроля и производственной дефектностью, уровень которой определяется технологическими параметрами применяемого метода формирования покрытия.

1.1. Предложено выражение (1) для прогнозирования эксплуатационной дефектности покрытия по начальной производственной дефектности с учетом условий эксплуатации.

- 1.2. Разработаны модели нормирования размера производственного дефекта по прочности и по водопоглощению покрытия СКТЗ.
- 1.3. Разработана методика оценки уровня производственной дефектности покрытия.
- 1.4. Предложена классификация производственных дефектов покрытий, выделены уровни качества покрытий. Для различных видов производственных дефектов определены коэффициенты опасности.
- 1.5. Разработана методика прогнозирования уровня риска отказа покрытия во время эксплуатации по уровню производственной дефектности и уровню производственного контроля.
2. Теоретически обоснована многослойность покрытий для повышения их качества; предложен метод уточняемого компенсирующего слоя, обеспечивающий размерную точность СКТЗ с многослойным покрытием.
 - 2.1. Получено выражение (2) для определения вероятности отказа по k -ому показателю качества многослойного покрытия из-за наличия недопустимого производственного дефекта, размер которого ограничен толщиной одного слоя.
 - 2.2. Получены выражения (3) и (4) для определения вероятности безотказной работы многослойного покрытия по прочности при отрыве от подложки и при растяжении соответственно, учитывающее число слоев и его дефектность.
 - 2.3. Введен коэффициент прочностной ортотропии (5) многослойного покрытия, который с уменьшением его дефектности (увеличением модуля Вейбулла) снижается.
 - 2.4. Предложен метод компенсирующего слоя, обеспечивающий размерную точность СКТЗ с многослойным покрытием. Разработаны методики обеспечения размерной точности СКТЗ с многослойным покрытием с помощью уточняемого механической обработкой компенсирующего слоя и с помощью уточняемыми регулирующими слоями компенсирующего слоя.
3. Предложен сверхзвуковой газодинамический метод напыления покрытий с многоструйной подачей газа, повышающий однородность покрытия из-за уменьшения размеров капель, что обуславливает высокую однородность напыленной смеси, обеспечивает повышение качества и снижение вероятности отказа покрытия.
 - 3.1. Обосновано применение составных сверхзвуковых струй газа для повышения дисперсности капель распыляемой композиции. Проведен анализ структур и свойств одиночной сверхзвуковой струи и составных сверхзвуковых струй газа. Показана развитая структура скачков уплотнения, возникающая при взаимодействии сверхзвуковых струй, при многоструйной подаче газа в факел распыления.
 - 3.2. Проведен анализ многослойных теплоизоляционных конструкций плоских и цилиндрических стенок СКТЗ, показавший эффективность применения ГНПМ и отражающих покрытий для локализации тепловых потоков.
 - 3.3. Предложены перспективные технические решения СКТЗ с интегральными теплоизоляционными покрытиями из ГНПМ и отражающими покрытиями.

3.4. Оценена эффективность теплозащитного экрана с напыленным интегральным теплоизоляционным покрытием и теплоотводящими каналами.

4. Экспериментально доказана закономерность (причинно-следственная связь) «технологические параметры распыления композиции → дисперсность капель → однородность напыленной смеси → дефектность (качество) отвержденного покрытия → вероятность отказа покрытия» реализуемая при сверхзвуковом газодинамическом напылении покрытия при многоструйной подаче газа. Снижение вероятности отказа покрытия обусловлено его многослойностью и однородностью материала.

4.1. Получены экспериментальные модели влияния технологических параметров сверхзвукового газодинамического напыления при многоструйной подаче газа на диаметр вторичных капель и на показатели качества многослойного покрытия.

4.2. Экспериментально установлено, что рациональное сочетание толщины и числа единичных слоев обеспечивает высокие показатели качества и низкую вероятность отказа многослойного покрытия.

4.3. Экспериментально апробирован метод уточняемого компенсирующего слоя для формирования сверхзвуковым газодинамическим напылением многослойного пенополиуретанового покрытия заданной размерной толщины. Для достижения заданной толщины уточнение компенсирующего слоя проводилось механической обработкой и регулирующими слоями.

5. СКТЗ с напыленными многослойными покрытиями повышают безопасность работников машиностроительных предприятий и улучшают условия их труда.

5.1. Предложены технические решения по изготовлению монолитных сверхзвуковых газодинамических узлов распыления с многоструйной подачей газа методом селективного лазерного плавления, применяемые для напыления многослойных покрытий СКТЗ.

5.2. Предложены технические решения СКТЗ с напыленными интегральными теплоизоляционными и отражающими многослойными покрытиями.

5.3. Улучшены условия труда работников участка термической обработки за счет применения СКТЗ. В результате проведенных мероприятий температура поверхностей перегородок и рабочих мест не превышает допустимых значений гигиенических норм.

Таким образом, цель диссертации достигнута – дано научное обоснование применения сверхзвукового газодинамического напыления при многоструйной подаче газа для повышения показателей качества многослойных покрытий средств коллективной теплозащиты, обеспечивающих улучшение условий труда и безопасность работников предприятий машиностроения.

Основные положения и результаты диссертации отражены в 125 опубликованных работах, в том числе 2 монографии, 32 патента РФ, 91 статья, из которых 60 статей опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

Монографии:

1. **Андрюшкин, А.Ю.** Применение сверхзвукового газодинамического напыления при многоструйной подаче газа для снижения вероятности отказа многослойных функциональных покрытий: Монография. /А. Ю. Андрюшкин. - СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2021. – 258с. ISBN 978-5-907324-26-8. (доля автора 100%).
2. **Андрюшкин, А.Ю.** Формирование дисперсных систем сверхзвуковым газодинамическим распылением: монография/А. Ю. Андрюшкин. - СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2012. - 400с. - ISBN 978-5-85546-673-7. (доля автора 100%).

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Андрюшкин, А.Ю.** Использование переработанных отходов пенополиуретанов при напылении покрытий /А.Ю. Андрюшкин //Научно-практический и учебно-методологический журнал «Безопасность жизнедеятельности». №12. -М.: Изд-во «Новые технологии», 2010. - С. 29-32. (доля автора 100%).
2. **Андрюшкин, А.Ю.** Послойное формирование элементов конструкций ракетно-космической техники из газонаполненных пластмасс напылением /А.Ю. Андрюшкин //Научно-технический журнал «Известия российской академии ракетных и артиллерийских наук», №1 (67), 2011 – С.72-78. (доля автора 100%).
3. **Андрюшкин, А.Ю.** Повышение функциональных и конструкционных свойств газонаполненных пластмасс /А.Ю. Андрюшкин //Научно-технический журнал «Известия российской академии ракетных и артиллерийских наук», №3 (69), 2011. – С.60-69. (доля автора 100%).
4. **Андрюшкин, А.Ю.** Технологии изготовления элементов конструкций ракетно-космической техники из газонаполненных пластмасс / А.Ю. Андрюшкин. // Журнал «Космонавтика и ракетостроение». №1. –Королев: ФГУП «ЦНИИМАШ», 2012. – С.162-168. (доля автора 100%).
5. **Андрюшкин, А.Ю.** Оптимальная организация узла диспергирования с многоструйной подачей газа /А.Ю. Андрюшкин // Журнал «Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия». №2.-М.: «Московский институт стали и сплавов», 2012. – С.17-23. (доля автора 100%).
6. **Андрюшкин, А.Ю.** О методике определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения /А.Ю. Андрюшкин, А.А. Цой //Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России». №2.-СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2016. – С.45-53. (доля автора 60%)
7. **Андрюшкин, А.Ю.** Технологические аспекты напыления многослойных покрытий на стационарную технику специального назначения / А.Ю. Андрюшкин, М.Ю. Михеенков, А.В. Чулков // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. СПб.: №7-8(109-110), 2017. – С. 68-76. (доля автора 70%).
8. **Андрюшкин, А.Ю.** Обеспечение минимальной разнотолщинности напыленных полимерных покрытий техники специального назначения / А.Ю. Андрюшкин, М.Ю. Михеенков, А.В. Чулков // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. СПб.: №9-10(111-112), 2017. – С. 54-60. (доля автора 70%).
9. **Андрюшкин, А.Ю.** Способ повышения безопасности использования корпусных деталей нефтеперерабатывающего оборудования /А.Ю. Андрюшкин, И.Л. Скрипник, Е.Н. Кадочникова //Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России». №2.-СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2017. – С.28-33. (доля автора 50%)
10. **Андрюшкин, А.Ю.** Исследование методов, обеспечивающих снижение пожарной и промышленной опасности на трубопроводы /А.Ю. Андрюшкин, В.А. Балабанов, Е.Н. Кадочникова //Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России». №3.-СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2017. – С.24-31. (доля автора 60%).
11. **Андрюшкин, А.Ю.** Совершенствование методов обеспечения безопасности объектов переработки, хранения и транспортировки углеводородов /А.Ю. Андрюшкин, Е.Н. Кадочникова, С.А. Пугачев //Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России». №4.-СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2017. – С.65-69. (доля автора 60%)
12. **Андрюшкин, А.Ю.** Исследование и разработка средств и методов, обеспечивающих снижение пожарной опасности нефтеперерабатывающего оборудования /А.Ю. Андрюшкин, М.Т. Пелех, Е.Н.

Кадочникова //Журнал «Проблемы управления рисками в техносфере». №2 (42).-СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2017. – С.89-96. (доля автора 60%).

13. **Андрюшкин, А.Ю.** Нанесение полимерных покрытий сверхзвуковым газодинамическим напылением, повышающим безопасность объектов переработки, хранения и транспортировки углеводородов /А.Ю. Андрюшкин, Е.Н. Кадочникова, С.А. Пугачев //Журнал «Проблемы управления рисками в техносфере». №1 (45).-СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2018. – С.79-85. (доля автора 70%).

14. **Андрюшкин, А.Ю.** Обеспечение безопасности эксплуатации тепловых сетей / А.Ю. Андрюшкин, Е.Н. Кадочникова, Е.О. Афанасьев // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России». №4.-СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2019. – С.37-42. (доля автора 70%).

15. **Андрюшкин, А.Ю.** Снижение опасности возникновения разрушения стыков труб тепловых сетей /А.Ю. Андрюшкин, Е.Н. Кадочникова, Е.О. Афанасьев //Журнал «Проблемы управления рисками в техносфере». №4 (52).-СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2019. – С.107-112. (доля автора 70%).

16. **Андрюшкин, А.Ю.** Модель влияния дефекта на вероятность возникновения отказа изоляционного покрытия трубопровода по параметру прочности /А.Ю. Андрюшкин, Е.Н. Кадочникова, Е.О. Афанасьев //Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России». №2.-СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2020. – С.11-15. (доля автора 70%).

17. **Андрюшкин, А.Ю.** Модель влияния размера дефекта на вероятность возникновения отказа изоляционного покрытия трубопровода по параметру водопоглощение /А.Ю. Андрюшкин, Е.Н. Кадочникова // Журнал «Проблемы управления рисками в техносфере». №3 (55). - СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2020. – С.72-76. (доля автора 70%).

Статьи и материалы конференций:

1.**Андрюшкин, А.Ю.** Применение газонаполненных пластмасс в средствах коллективной теплозащиты работников машиностроения /А.Ю. Андрюшкин, С.А. Мещеряков, А.Е. Шашурин // По результатам 4-й Всероссийской национальной НПК «Теория и практика безопасности жизнедеятельности». Научно-технический журнал «Труды РГУПС», № 2 (55), 2021 – С.15-21. (доля автора 50%)

2.**Андрюшкин, А.Ю.** Исследование напыленных полимерных покрытий, обеспечивающих снижение пожарной и промышленной опасности нефтеперерабатывающего оборудования /А.Ю. Андрюшкин, Е.Н. Кадочникова //В сборнике: «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Обеспечение комплексной безопасности жизнедеятельности населения». Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции. - СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2017. – С.154-155. (доля автора 60%)

3.**Андрюшкин, А.Ю.** Оценка вероятности возникновения отказа изоляционного покрытия по параметрам прочности и водопоглощения / А.Ю. Андрюшкин, Е.Н. Кадочникова // Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции «Надежность и долговечность машин и механизмов», 16 апреля 2020 г ФГБОУ ВО Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России. – С. 3 – 5. (доля автора 60%).

Патенты РФ на изобретения и полезные модели:

1.**Патент** на изобретение №2350402 МПК⁷ В05В 7/08. Распылитель с согласованием расхода жидкости и рабочего газа /Андрюшкин А.Ю. Заявитель и патентообладатель: БГТУ «ВОЕНМЕХ». Заявка: 2008101199/12 от 09.01.2008, опубликован 27.03.2009. Бюллетень №9. (доля автора 100%).

2.**Патент** на полезную модель №92811 МПК⁷ В01F 5/18. Секторный распылитель /Андрюшкин А.Ю. Заявитель и патентообладатель: БГТУ «ВОЕНМЕХ». Заявка: 2009142579/22 от 18.11.2009, опубликован 10.04.2010. Бюллетень №10. (доля автора 100%).

3.**Патент** на полезную модель №105326 МПК⁷ Е04С 2/00. Трехслойная панель с наполнителем из газонаполненной пластмассы /Андрюшкин А.Ю. Заявитель и патентообладатель: БГТУ «ВОЕНМЕХ». Заявка: 2011101133/03 от 12.01.2011, опубликован 10.06.2011. Бюллетень №16. (доля автора 100%).

4.**Патент** на изобретение №2430937 МПК⁷ С08J 11/04. Способ переработки пенополиуретановых отходов /Андрюшкин А.Ю. Заявитель и патентообладатель: БГТУ «ВОЕНМЕХ». Заявка: 2010109560/05 от 15.03.2010, опубликован 10.10.2011. Бюллетень №28. (доля автора 100%).

5. **Патент** на полезную модель №109999 МПК⁷ B05B 7/28. Распылитель с многоструйной подачей жидкости и газа /Андрюшкин А.Ю. Заявитель и патентообладатель: БГТУ «ВОЕНМЕХ». Заявка: 2011115268/05 от 18.04.2011, опубликован 10.11.2011. Бюллетень №31. (доля автора 100%).
6. **Патент** на полезную модель № 111779 МПК⁷ B05B 7/08. Многосопловой распылитель /Андрюшкин А.Ю. Заявитель и патентообладатель: БГТУ «ВОЕНМЕХ». Заявка: 2011124829/05 от 17.06.2011, опубликован 27.12.2011. Бюллетень №36. (доля автора 100%).
7. **Патент** на изобретение №2439199 МПК⁷ C23C 24/04. Способ формирования многослойного покрытия, содержащего наночастицы /Андрюшкин А.Ю. Заявитель и патентообладатель: БГТУ «ВОЕНМЕХ». Заявка: 2010101438/02 от 18.01.2010, опубликован 10.01.2012. Бюллетень №1. (доля автора 100%).
8. **Патент** на изобретение № 2465141 МПК⁷ B29C70/60. Способ формирования армированной дискретными элементами газонаполненной пластмассы /Андрюшкин А.Ю. Заявитель и патентообладатель: БГТУ «ВОЕНМЕХ». Заявка: 2011101115/05 от 12.01.2011, опубликован 27.10.2012. Бюллетень №30. (доля автора 100%).
9. **Патент** на изобретение №2744140 МПК F16L 59/20. Способ теплогидроизоляции стыка предварительно изолированных труб /Андрюшкин А.Ю., Левихин А.А., Мещеряков С.А., Кравченко Д.Г. Заявитель и патентообладатель: БГТУ «ВОЕНМЕХ». Заявка: 2019139505 от 22.01.2020, опубликован 03.03.2021. Бюллетень №7. (доля автора 50%).

Издательство Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1.
Формат 60x90/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная. Тираж 130 экз.

Отпечатано в типографии БГТУ.
190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1.