

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ПРОЧНОСТИ

На правах рукописи

КОРЯГИН Сергей Иванович

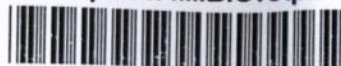
УДК 678.5.046.364:629.12.001

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НЕСУЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
КОНСТРУКЦИЙ,
УПРОЧНЕННЫХ АРМИРОВАННЫМИ
ПОЛИМЕРНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**

**05.02.09. Динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Киев - 1995



00778258 (.)

Аб
Работа выполнена в И
университете.

Научный консультант: академик НАН Украины, доктор
технических наук, профессор
Г.С.Писаренко.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,

профессор

Г.В.Исаханов

доктор физико-математических наук,

профессор

А.А.Каминский

доктор технических наук

В.Н.Бастун

Ведущая организация - Научно-исследовательский институт
горной механики им. М.М.Федорова,
г. Донецк.

Защита состоится "29" 06 1995 года на заседании
специализированного Совета Д.01.98.01 при Институте проблем
прочности НАН Украины в помещении конференц-зала (252014, г. Киев -
14, ул. Тимирязевская, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института.

Автореферат разослан "29" 05 1995 года.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
специализированного Совета,
доктор технических наук

Ф.Ф.Гигиняк

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время в различных отраслях промышленности отмечается необходимость более широкого использования при создании современной техники новых конструкционных материалов и технологий, обеспечивающих высокий технико-экономический эффект. К числу наиболее перспективных технологических процессов, направленных на совершенствование производства, экономию металла и снижение трудоемкости ремонтных работ, относится нанесение на элементы металлических конструкций (ЭМК) полимерных покрытий (ПП).

Однако, возможности такого рода покрытий до настоящего времени использованы еще недостаточно: не изучена несущая способность деталей с покрытиями, а также области их рационального применения в различных отраслях народного хозяйства, в частности, отсутствуют достаточно проверенные на натуральных деталях рекомендации по использованию ПП при повышении и восстановлении несущей способности (ПиВНС) поврежденных ЭМК. Эти обстоятельства обуславливают большую актуальность теоретических и экспериментальных исследований, направленных на рациональное накопление необходимой информации о различных аспектах прочности деталей с покрытиями и ее обобщения на базе достоверных данных о деформировании и разрушении системы металл-ПП, разработку рекомендаций по оптимизации технологических процессов, приемов ПиВНС путем адгезионного упрочнения и эффективного применения данных покрытий в различных отраслях народного хозяйства.

Целью работы является разработка научно-обоснованных способов создания элементов металлических конструкций, упрочненных полимерными покрытиями, оценка их несущей способности с учетом особенностей свойств металла и покрытия, влияния агрессивных сред, эксплуатационно-технологических факторов, характера температурно-силовых воздействий, разработка новых и совершенствование существующих методов обеспечения несущей способности клеевых соединений в металлических конструкциях с полимерными покрытиями, выявление областей их эффективного применения с требуемым нормативным сроком эксплуатации и внедрение полученных результатов в народное хозяйство.

Научная новизна диссертационной работы заключается в создании комплексного экспериментально-расчетного метода оценки предельного состояния элементов металлических конструкций, упрочненных полимер-

ными покрытиями в реальных условиях эксплуатации, на базе которого показана многофункциональность этих покрытий.

Впервые разработаны новые методы механических испытаний элементов металлических конструкций, упрочненных полимерными покрытиями при воздействии статистических и динамических нагрузок, специально спроектированы и созданы оригинальные установки и оборудование для этих целей, позволяющие впервые определить характеристики прочности, демпфирующую способность, механизмы разрушения металлополимерных материалов при воздействии различных нагрузок и климатических факторов, и на их основе разработать рекомендации по совершенствованию технологии производства, рецептуры покрытий с целью обеспечения несущей способности клеевых соединений в металлических конструкциях с полимерными покрытиями.

Получены диаграммы предельного напряженного состояния клеевых металлополимерных соединений при кратковременной и длительной нагрузках, совместном действии нормальных и касательных напряжений в различном диапазоне их соотношений. Показано, что принципы оценки работоспособности материалов в условиях сложного напряженного состояния для однородных материалов применимы и для клеевых металлополимерных соединений.

Предложен новый подход к оценке трещиностойкости клеевых металлополимерных материалов, основанный на изучении механизма разрушения на стадиях инициирования, роста и остановки трещин. Установлена зависимость характеристик трещиностойкости этих материалов при кратковременном и длительном статическом нагружении от вида напряженного состояния в вершине трещины, а также степень влияния воды и нефтепродуктов на характеристики вязкости разрушения металлополимерных материалов.

Установлены особенности и закономерности коррозии ЭМК в процессе эксплуатации, выполнена систематизация типовых элементов, наиболее интенсивно поврежденных коррозией и оценка степени их разупрочнения.

Проведенные комплексные исследования послужили базой для разработки типовых схем обеспечения несущей способности клеевых соединений в ЭМК и деталях механизмов (ДМ), системы рекомендаций по нанесению покрытий на изделия в целях ремонта и защиты.

Достоверность полученных результатов подтверждена удовлетворительным совпадением расчетных, экспериментальных и натуральных резуль-

татов, а также их непротиворечивостью приводимым в литературе данным. Основные выводы по исследованию поведения рассматриваемых композиционных (металлополимерных) конструкций при действии статических и динамических нагрузок получены на образцах и ЭМК и проверены на натуральных изделиях в реальных условиях эксплуатации. Результаты проверки подтвердили высокую представительность данных, полученных на образцах и ЭМК.

Практическая ценность работы состоит в получении новых закономерностей, указывающих пути рационального проектирования, выбора технологии изготовления и сборки изделий из металлополимерных клеевых материалов. Результаты работы являются научной основой для разработки рекомендаций по совершенствованию рецептур клеевых композиций и нормативно-технических документов по применению ПП в целях защиты, ПивНС различных объектов техники; при решении многих задач прочности композиционных материалов и элементов из них; при постановке и проведении модельных испытаний элементов из металлополимерных материалов на прочность; при разработке принципов склеивания и создании металлополимерных материалов с заранее заданными характеристиками прочности. На основе полученных данных впервые предложены, экспериментально обоснованы и разработаны новые методы ПивНС ЭМК, в том числе корпусно-емкостного оборудования, а также новое технологическое оборудование для обработки корпуса судна, шахтных подъемных комплексов и контроля качества материалов.

Реализация работы. На базе выполненных исследований разработано семь нормативно-технических документов по применению ПП в различных отраслях народного хозяйства. Результаты работы используются предприятиями Минуглепрома Украины, Минрыбхоза, Минречфлота, Миннефтепрома России и др. при создании и внедрении методов ПивНС ЭМК и ДМ с применением ПП.

Материалы диссертации включены в учебное пособие "Применение полимерных материалов при ремонте судовых конструкций и деталей механизмов промысловых судов" (Калининград, Всесоюзный ИПК руководящих работников и специалистов рыбной промышленности и хозяйства, 1982. -131 с.), используется в лекциях по курсу "Машиноведение" для студентов Калининградского государственного университета. Все приведенные в работе исследования выполнены в рамках Отраслевой комплексной целевой программы "Ремонт", Республиканской комплексной целевой

программы "Восстановление и упрочнение деталей машин" и тематического плана НИР Калининградского государственного университета. От внедрения результатов работы получен экономический эффект в сумме более одного миллиона рублей в ценах 1990 года, подтвержденный соответствующими актами.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на: I-III НТК им. акад. А.Н.Крылова, посвященной памяти проф. А.Г.Архангородского, Калининград, 1979, 1981 и 1984; ВДНХ СССР, Москва, 1979 и 1980 (автор удостоен двух бронзовых медалей ВДНХ СССР, удостоверения № 17784 и № 6123); Всесоюзной НТК "Повышение эффективности использования трудовых ресурсов в судоремонте", Ленинград, 1982; I и II Уральской зональной НТК "Применение композиционных материалов на полимерной, металлической матрицах в машиностроении", Уфа, 1982 и 1985; НТС "Состояние и перспективы создания и внедрения коррозионно-стойких материалов, средств и методов противокоррозионной защиты судов", Владивосток, 1982; Межведомственном совете по судоремонту при Госплане СССР, Архангельск, 1983; II Всесоюзный НТК по полимерным композиционным материалам и их применению в народном хозяйстве, Ташкент, 1983; II Всесоюзный НТК "Композиционные полимерные материалы - свойства, производство и применение", Москва, 1984; VI НТК по развитию флота рыбной промышленности и промышленного рыболовства социалистических стран - членов СЭВ, Ленинград, 1984; II Республиканской конференции по повышению надежности и долговечности машин и сооружений, Днепропетровск, 1985; НТК профессорско-преподавательского состава Калининградского госуниверситета 1985 - 1994; XIV НТК по рассеянию энергии при колебаниях механических систем, Чернигов, 1986; V симпозиуме по механике конструкций из композиционных материалов, Миасс, 1986; Всесоюзной научно-практической конференции по вопросам преподавания машиноведения и основ производства на факультетах общетехнических дисциплин, Новокузнецк, 1986; VI Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике, Ташкент, 1986; НТК "Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела", Калининград, 1987; Тематическом семинаре Института проблем прочности НАН Украины, Киев, 1987, 1992 и 1995.

Публикации. Результаты выполненных исследований нашли отражение в 57 опубликованных работах, включая 24 авторских свидетельства на изобретения, одну монографию и одно учебное пособие.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, основных выводов по работе, библиографии и приложения. Работа изложена на 282 страницах машинописного текста, содержит 28 таблиц, 234 рисунка, 58 фотографий и список использованной литературы из 536 наименований.

Личный вклад автора. Автором диссертации разработано оборудование и методики исследования несущей способности клеевых металлополимерных соединений при статических и динамических нагрузках. Обработаны и проанализированы экспериментальные данные клеевых соединений при действии различных нагрузок. Разработаны новые методы обеспечения несущей способности клеевых соединений в металлических конструкциях с полимерными покрытиями и нормативно-технические документы, регламентирующие применение полимерных покрытий в различных отраслях промышленности.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава содержит анализ причин и закономерностей коррозии ЭМК в процессе эксплуатации, методов восстановления их несущей способности и сопоставительные исследования характеристик прочности различных клеевых композиций.

Выполненный в работе анализ причин и закономерностей, вызывающих повышенную коррозию, позволяет своевременно обратить особое внимание на конструкции и принять меры по устранению или уменьшению ее, а также предусмотреть на стадии проектирования объектов техники технические решения, ограничивающие разупрочнение ЭМК, что позволяет значительно повысить эксплуатационные характеристики конструкции и увеличить срок их службы. Критерием необходимости восстановления пораженных коррозией конструкций является предотвращение и уменьшение дальнейшего коррозионного процесса и связанного с ним снижения прочности ниже допустимых значений, обеспечения герметичности, жесткости и локальной прочности. Кроме того, весь комплекс профилактических и восстановительных мероприятий должен учитывать особенности коррозии, ее причины и закономерности, то есть должны быть предусмотрены конструктивные предложения, направленные на разработку новых и совершенствование существующих методов обеспечения несущей способности клеевых соединений в металлических конструкциях с полимерными покрытиями.

В работе приведена классификация ЭМК рыбопромысловых судов, наиболее интенсивно поврежденных коррозией в процессе эксплуатации, которые подлежат восстановлению из-за сквозных проржавлений. Так как в данном случае общая прочность конструкции достаточна и речь может идти только о ликвидации сквозных проржавлений, то в этом случае нет необходимости заменять полностью конструкцию, а нужно найти оптимальный метод ремонта поврежденного участка. Из литературы известно, что существенное влияние на изменение ресурса конструкции оказывают методы восстановления их несущей способности. Выбор оптимального метода восстановления конструкций обосновывают не только экономическими расчетами, которые оценивают затраты средств и времени на ремонтные работы, но и техническими показателями конструкции, восстановленной данным методом. С этой целью в работе выполнен обзор и анализ методов ПивНС пораженных коррозией ЭМК на примере рыбопромысловых судов, показаны их недостатки и границы применения. В результате анализа существующих методов восстановления и появившихся в последние годы новых клеевых композиций, представляется целесообразным подойти к ПивНС ЭМК с принципиально новым решением - адгезионным упрочнением ПП с учетом эксплуатационно-технологических факторов.

В работе проведен комплекс сопоставительных экспериментальных исследований характеристик прочности различных клеевых композиций, анализ которых позволил выбрать в качестве объектов исследования для формирования ПП и композиционных материалов связующие типа "ВАК" и "Спрут", как наиболее удовлетворяющих требованиям многих отраслей народного хозяйства и полимеризующихся в воде и нефтепродуктах. Склеивание образцов производили на воздухе, в воде и в нефти. В качестве примера на рис.1 приведена кинетика изменения прочности клеевого соединения образцов стали ВМ Ст. 3 сп, склеенных на воздухе на основе композиций "Спрут-5М-3" (1), "Спрут-9М" (2) и "ВАК-А" (3) при равномерном отрыве (а) и сдвиге (б). Исследования позволили сделать вывод что композиции типа "ВАК" необходимо использовать в основном для склеивания в водной среде и на воздухе, а типа "Спрут" - в нефти и на воздухе. Были выполнены исследования с целью определения несущей способности сплошных листовых элементов из ПП размером 4×800×140 мм и восстановленных элементов с трещиной и пробоиной, заформованных покрытием при действии гидростатического давления. Исследования позволили определить оптимальные схемы заформовки трещин и пробоин в этих элементах

при данном виде нагружения, получить зависимость давление-прогиб и распределение деформаций в элементах в направлениях вдоль сторон опорного контура.

Первая глава заканчивается формулировкой задач исследования, характеристикой работы в целом и структурой факторов, влияющих на прочность клеевых металлополимерных соединений.

Вторая глава посвящена исследованиям, направленным на выявление и установление зависимостей между адгезионной прочностью, критической деформацией подложки и основными технологическими параметрами, а также разработке новых методик экспериментального исследования прочности. Кроме того выполнена оценка вида напряженного состояния ПП, нанесенного на ЭМК с отверстием и трехслойной конструкции с данным покрытием.

Механика композиционных материалов является в настоящее время сложившимся направлением в механике деформируемого твердого тела, становлению и развитию которого способствовали работы С.А.Амбарцумяна, В.А.Белого, В.Л.Бидермана, В.В.Болотина, И.И.Гольденבלата, А.Я.Гольдмана, А.Н.Гузя, Б.В.Дерягина, А.А.Ильюшина, Г.В.Исаханова, А.А.Каминского, А.А.Лебедева, А.К.Малмейстера, Н.А.Махутова, В.В.Мошева, Г.С.Писаренко, Б.Е.Победри, В.Д.Протасова, А.Р.Рабиновича, Ю.Н.Работнова, А.М.Скудры, В.С.Стреляева, В.П.Тамужа, Ю.М.Тарнопольского, В.Т.Томашевского, В.Т.Трощенко, Р.А.Турусова, П.М.Огибалова, Л.Н.Хорошуна, Ю.Н.Шевченко, К.Герасовича, Р.Крока, З.Хашана, С.Цая и других ученых.

В диссертации представлен подробный анализ работ, посвященных теориям адгезии и экспериментальным методам оценки прочности, используемых в различных видах адгезионных соединений. В результате этого анализа выполнена оценка возможности применения известных теорий и методов для решения задач прочности ЭМК с ПП в условиях формирования покрытий и эксплуатационных, а также разработаны новые методики исследования и оборудование для решения этих задач.

В проводимых в работе исследованиях материалом подложки является в основном сталь ВМ Ст. 3 сп и сплав АМг. Количество металлополимерных элементов, предназначенных для получения одной экспериментальной точки, в зависимости от вида нагружения находилась в пределах от 3 до 15 шт. Исследовано влияние изгибных и растягивающих нагрузок на деформированное состояние металлополимерного материала и определены

величины максимальных линейных деформаций подложки, при которых покрытие сохраняет адгезионную связь при их совместном деформировании. Микронеоднородные пластические деформации поверхностного слоя металла исследовались с помощью метода реперных точек. Наблюдение за элементами в процессе деформирования при испытаниях на растяжение показало, что разрушению металлополимерного материала предшествует когезионное разрушение ПП с одновременным или наиболее ранним нарушением адгезионной связи, то есть отслаиванием. С появлением растрескивания клеевой композиции, разрыва волокон стеклоткани и отслаивания происходила потеря защитных и упрочняющих свойств покрытия. Исследования показали, что разрушение вследствие сдвига между слоями стеклоткани наблюдается только при изгибе металлополимерного материала сосредоточенной силой с малым отношением длины пролета к высоте сечения. Во всех остальных вариантах изгиба, наиболее часто встречающихся в практике, разрушение материала происходит в сжатой зоне.

Испытания элементов на изгиб установили, что разрушение в зоне растяжения наступило позже, чем в зоне сжатия при линейных деформациях поверхностного слоя материала подложки, равных 0,25-0,35%. При действии изгибающей нагрузки сначала происходит разрушение самого внешнего слоя, а затем оно распространяется внутрь материала покрытия. Это объясняется различным характером предельного состояния и механизмом разрушения ПП при растяжении и сжатии. В сжатой зоне разрушение ПП происходит в виде выпучивания наружного слоя стеклоткани (образуются складки) с последующим отслаиванием от металла, то есть сжатые волокна стеклоткани утрачивают упругую устойчивость. При действии сжимающих сил, когда достигается предел устойчивости, клеевая композиция утрачивает способность удерживать волокна стеклоткани, и покрытие разрушается. В растянутой зоне разрушение покрытия происходит в виде разрыва волокон стеклоткани с последующим нормальным отрывом от подложки. Получена зависимость разрушающей нагрузки от соотношения толщин покрытия и подложки при изгибе и растяжении.

Показано, что микронеоднородные пластические деформации металла и изменение рельефа приводят к разрушению адгезионной связи, то есть участки поверхностного слоя металла являются концентраторами напряжений, которые резко снижают прочность металлополимерного элемента. Прочность этого элемента оценивалась по линейным деформациям поверх-

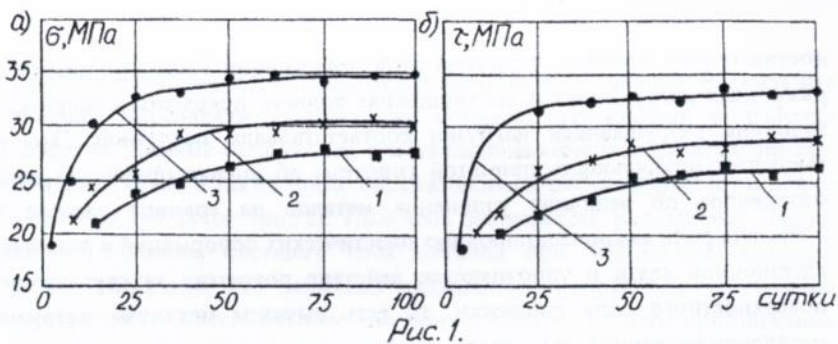


Рис. 1.

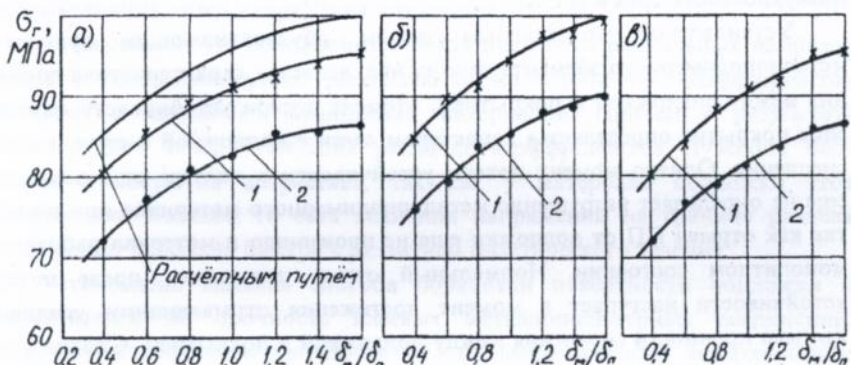


Рис. 2. а), б), в): 1-метод разрезания колец; 2-метод обточки колец.

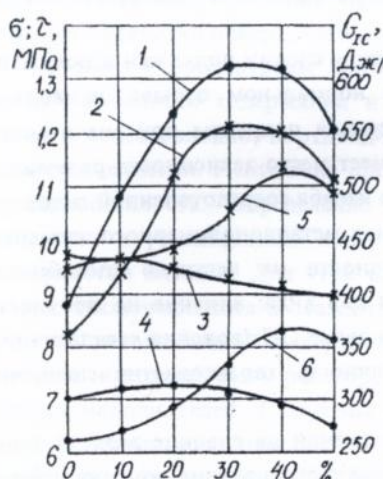


Рис. 3. 1, 2 - нормальный отрыв; 3, 4 - сдвиг; 5, 6 - трещиностойкость; 1, 4, 6 - Струт-5М; 2, 3, 5 - Струт-9М.

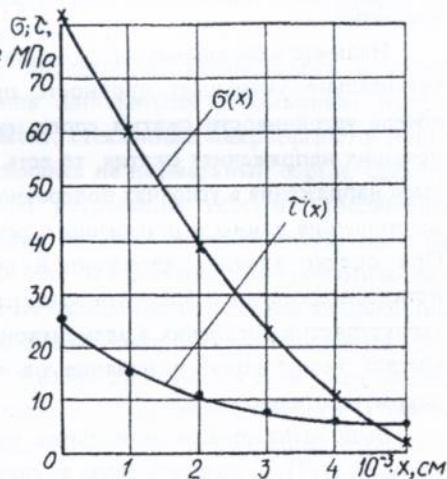


Рис. 4.

ностного слоя металла. Величина этой деформации была стабильной при различных нагружениях и соотношениях толщин покрытия и подложки, а величина разрушающей нагрузки соответствовала расчетной. Это подтверждает правильность принятой гипотезы об оценке прочности данных материалов по величине удлинения металла на границе раздела фаз. Показана роль микронеоднородных пластических деформаций в разрушении адгезионной связи и упрочняющее действие покрытия за счет стеснения поверхностного слоя подложки, то есть выявлен механизм разрушения металлополимерного материала и факт повышения предела текучести поверхностного слоя металла.

Установлено, что главным звеном, обуславливающим прочность металлополимерного элемента при изгибе, является характеристика сцепления между подложкой и покрытием. Момент потери устойчивости сжатого слоя покрытия определяется характером связи с подложкой и прежде всего сцепления. Однако момент потери устойчивости в сжатом слое покрытия еще не определяет разрушение металлополимерного материала при изгибе, так как отрыва ПП от подложки еще не произошло и материал работает в монолитном состоянии. Нормальный отрыв покрытия после потери устойчивости наступает в момент достижения отрывающими усилиями предела прочности сцепления между подложкой и покрытием. Сжатие чаще всего приводит не к непосредственному разрушению металлополимерного элемента по адгезионному слою, а к потере устойчивости сжатого слоя покрытия.

Наличие касательных напряжений между слоями подложки и покрытия значительно уменьшает прочность при нормальном отрыве, приводя к потере устойчивости сжатых слоев материала покрытия при значительно меньших напряжениях сжатия, то есть имеет место зависимость разрушающего напряжения в условиях поперечного изгиба сосредоточенной силой, от соотношения длины и поперечного сечения металлополимерного элемента. При оценке влияния адгезионной прочности на несущую способность металлополимерного элемента выделены два вида: влияние на прочность характеристик сцепления в элементарном звене ПП (волокна стеклоткани - клеевая композиция) и влияние на прочность характеристик сцепления покрытия с подложкой.

Выполнена оценка радиальных напряжений на границе раздела слоев металла и ПП, возникающих в процессе изготовления криволинейных металлополимерных элементов. Для подтверждения корректности расчетной

зависимости были проведены экспериментальные исследования. Радиальные напряжения определяли с помощью методов, изложенных в работах И.А.Биргера. Данные напряжения в металлополимерных элементах определяли на воздухе (а), а также после выдерживания в морской воде (б) и нефти (в) в течение 100 суток (рис.2). Получена зависимость радиальных напряжений от толщины несущего слоя металла при постоянной толщине покрытия. Показано, что величина радиального напряжения на границе раздела достигает максимального значения и убывает по мере приближения к поверхности, то есть с увеличением толщины металлополимерного элемента величина этого напряжения возрастает.

Установлено, что основной причиной появления радиальных напряжений в металлополимерных элементах является различие коэффициентов Пуассона и линейного расширения материалов. Причем в результате пластического течения металла различие коэффициентов Пуассона подложки и покрытия возрастает, так как у материала подложки этот коэффициент больше, то есть величина напряжений на границе раздела слоев растет довольно быстро с развитием пластического течения.

Установлено влияние способа обработки поверхности подложки и наполнителей на прочность клеевых металлополимерных соединений. Получены зависимости прочности ПП от шероховатости поверхности и клеевого соединения от толщины покрытия при равномерном отрыве и сдвиге. Показано изменение прочности этих соединений при сдвиге от способа обработки поверхности подложки.

В работе рассмотрены методы определения оптимального с точки зрения прочности содержания и типа наполнителя (алюминивая пудра, графит, стекловолокно, портланд-цемент, стеклянные микросферы) в полимерном покрытии. Испытания проводились на нормальный отрыв, сдвиг и трещиностойкость. Определение типа разрушения клеевого соединения сводилось к установлению присутствия остатков клеевой композиции на поверхности металла. Для этой цели был использован электрохимический метод, заключающийся в осаждении на свободные от клеевой композиции участки металлической поверхности ионов более электроположительного металла, находящегося в растворе. Показана зависимость σ_u и τ_u от длины частиц наполнителей. Получены зависимости трещиностойкости и прочности клеевых соединений с наполнителями при нормальном отрыве и сдвиге на основе композиций "Спрут-5М" и "Спрут-9М". На рис.3 приведены зависимости для стеклянных микросфер. Установлено, что оптимальное с

точки зрения прочности содержание наполнителя в клеевой композиции соответствует точке когезионно-адгезионного перехода, которая может быть определена в испытаниях на нормальный отрыв или трещиностойкость.

С помощью метода конечных элементов выполнена оценка напряженно-деформированного состояния трехслойной конструкции с ПП. Несущие слои конструкции жестко стягиваются заклепками. Расчетная модель представлена в виде совокупности объемных призматических конечных элементов, имеющих по три линейных перемещения в каждом из восьми узлов (покрытие), а также прямоугольных пластинчатых элементов (несущие металлические слои), работающих на изгиб и в плоскости. Указанные элементы накладываются один на другой. Работа подкрепляющих ребер, а также заклепок аппроксимируется работой стержневых конечных элементов с шестью перемещениями в каждом узле. Матрица жесткости трехслойной конструкции формируется в виде суммы блоч-матриц аналогичного назначения несущих слоев, покрытия и заклепок. При этом узловые перемещения расчетной модели конструкции нумеруются последовательно в направлении снизу вверх, что приводит к четырех-блочной результирующей матрице. В результате расчета определены рациональная схема соединения несущих слоев, технология изготовления и сборки данных конструкций, а также перемещения и напряжения в узлах соединения этих слоев.

Рассмотрена задача об осесимметричном равновесии армированного полимерного слоя толщиной h , одна из граней которого не нагружена, а вторая нагружена в пределах окружности с радиусом $r=a$ равномерным давлением q и имеет сцепление с жесткой металлической подложкой вне указанной окружности. Поставленная задача решалась известными методами теории упругости с использованием представления Папковича-Нейбера перемещений и напряжений через две гармонические функции, а также с применением результатов работ Я.С.Уфлянда. Граничные условия задачи могут быть записаны следующим образом:

$$\sigma_z|_{z=h} = 0; \quad \tau_{rz}|_{z=h} = 0; \quad \sigma_z|_{z=0} = q = const; \quad w|_{z=0} = 0; \quad u|_{z=0} = 0,$$

где w , u - составляющие вектора перемещения в цилиндрических координатах.

Задача сводится к системе парных интегральных уравнений следующего вида:

$$A_{33}(K_1 S_1^2 - K_2 S_2^2) \int_0^{\infty} \frac{\mu sh \alpha - \eta sh \beta \cdot ch \alpha}{sh \alpha (ch \alpha + \mu ch \beta)} B t^2 J_0(t_r) dt = q, \quad \text{при } r < a;$$

$$\int_0^{\infty} [K_1 S_1 (1 - \eta sh \alpha \cdot sh \beta + \mu ch \alpha \cdot ch \beta) + (\mu \eta - \mu sh \beta \cdot sh \alpha + \eta \cdot ch \alpha \cdot ch \beta)] \times \frac{B t J_0(t_r)}{sh \alpha (ch \alpha + \mu ch \beta)} dt = 0,$$

при $r > a$.

Систему парных линейных уравнений решали по методу, предложенному Я.С.Уфляндом, и получили окончательный вид интегрального уравнения:

$$J(x) = -\frac{20q}{\pi \Delta} + \frac{1}{\pi} \int_0^a J(y) [G(y+x) + G(y-x) - G(a+x) - G(a-x)] dy.$$

Данное уравнение решалось численно. Получена зависимость σ и τ от длины перекроя покрытием контура отверстия, которая использовалась в дальнейших исследованиях (рис.4).

В третьей главе рассмотрено применение методов линейного программирования при оптимальном планировании эксперимента, описаны методики оценки и результаты исследования характеристик трещиностойкости клеевых соединений применительно к условиям нагружения, соответствующим трещинам нормального отрыва, поперечного сдвига, а также комбинированного нагружения нормального отрыва и поперечного сдвига, с учетом эксплуатационно-технологических факторов.

Для оптимального планирования экспериментальных исследований в работе предложено использовать методы линейного программирования в виде модели, в которой целевая функция задается как минимум приведенных затрат, а система ограничений - неравенствами по заданной точности получения результатов на различных этапах проведения испытаний. Показана возможность и целесообразность применения предложенной модели для решения вопросов, касающихся оптимального планирования экспериментальных исследований по оценке характеристик прочности металлополимерных материалов.

Существенный вклад в разработку методов определения характеристик трещиностойкости клеевых соединений внесли ученые: Г.И.Баренблатт, В.Н.Бастун, В.В.Болотин, Р.В.Гольдштейн, А.А.Каминский, А.Я.Красовский, Е.М.Морозов, Н.Ф.Морозов, В.П.Науменко, В.В.Панасюк, В.З.Партон, Г.С.Писаренко, В.В.Покровский, Е.Б.Тростянская, Л.П.Хорошун, Г.П.Черепанов, Дж.Андерсон, М.Вильямс, Дж.М.Ирвин, Х.Т.Кортен, Дж.М.Крафт, С.Мостовой, Е.Риплинг и др. В настоящее время недостаточно еще исследованы характеристики трещиностойкости клеевых соединений, и

поэтому разработка новых экспериментальных методик определения этих характеристик, позволяющих повысить точность испытаний, представляется актуальной задачей.

В качестве клеевых композиций применялись связующие "ВАК-А", "Спрут-5М", "Спрут-5М-3" и "Спрут-9М". Армирующим материалом являлась стеклоткань марки Т-II-ГВС-9, а подложки - сталь ВМ Ст. 3 сп. Исследования проводились на двойных консольных балках (ДКБ-образец) и на образцах "пузырь под давлением" по нашим разработанным методикам. Для ДКБ-образца величину удельной энергии продвижения трещины определяли по зависимости:

$$G = \frac{M^2}{2b} \left[\frac{1}{E_1 J_1} + \frac{k^2}{E_2 J_2} - \frac{(1-k)^2}{(EJ)_0} \right],$$

где b - ширина клеевого шва; $(EJ)_0$ - изгибная жесткость единицы длины склеенного образца.

Определение условий нагружения образца с балками из различных материалов, обеспечивающих получение межслойной трещины требуемого типа, выполняли на базе расчетов напряженного состояния в клеевом шве. Определяли коэффициенты влияния единичных моментов (\bar{M}) на величины нормальных и касательных напряжений на продолжении разреза в клеевом шве $C_1^\sigma, C_2^\sigma, C_1^\tau, C_2^\tau$; $\bar{\tau}_1 = \bar{M} C_1^\tau$; $\bar{\tau}_2 = \bar{M} C_2^\tau$; $\bar{\sigma}_1 = \bar{M} C_1^\sigma$; $\bar{\sigma}_2 = \bar{M} C_2^\sigma$. Из условия равенства нулю σ и τ при нагружении образца двумя неравными изгибными моментами определяли соотношение величин этих моментов: $k^I = -C_1^\tau / C_2^\tau$ и $k^{II} = -C_1^\sigma / C_2^\sigma$. Нагружение ДКБ-образца системой моментов M и $k \cdot M$ представляли суммой двух систем изгибных моментов M^I и $k^I \cdot M^I$, соответствующих трещине нормального отрыва, а также M^{II} и $k^{II} \cdot M^{II}$ - поперечного сдвига. Величины M^I и M^{II} находили из систем уравнения:

$$M^I + M^{II} = M; \quad k^I \cdot M^I + k^{II} \cdot M^{II} = k \cdot M.$$

Вид напряженного состояния в окрестности вершины в данном случае определяется величиной коэффициента k : $G_I/G_{II} = f(k)$.

Кинетику докритического разрушения клеевого соединения определяли на ДКБ-образцах с предварительно изогнутыми балками. Величину силы продвижения межслойной трещины находили из выражения:

$$G_{(a)} = \frac{1}{2bR_{(a)}^2} \left[E_1 J_1 + k^2 E_2 J_2 - \frac{(E_1 J_1 - k E_2 J_2)^2}{(EJ)_0} \right].$$

В результате выполненных исследований получены зависимость податливости образца от длины трещины и распределение напряжений по

длине образца в клеевом шве и подложке, а также зависимость трещиностойкости от толщины ПП и размеров консольного образца. Построены диаграммы момент-угол поворота. Величины удельных энергий продвижения трещины, соответствующие старту G_{IC} , определяли по величине наибольшего изгибного момента, а G_{iK} определяли по величине изгибного момента при остановке трещины. Установлено, что характер трещин для клеевых композиций "Спрут-5М" и "Спрут-5М-3" - устойчивый, а для "Спрут-9М" и "ВАК-А" - скачкообразный.

Получены диаграммы докритического разрушения для этих композиций при испытании клеевого соединения на воздухе, в нефтепродуктах, дистиллированной и морской воде, то есть определяли скорость продвижения трещины в зависимости от величины G_r . Испытания показали, что нефтепродукты практически не оказывают влияния на скорость продвижения трещины, а воздействие воды приводит к повышению скорости. Наибольшей трещиностойкостью обладают клеевые соединения на основе композиции "ВАК-А". Трещиностойкость зависит от типа трещин, то есть от вида напряженного состояния, так как полимерный материал в клеевом шве имеет неоднородную структуру, а плотность его является функцией энергии когезии полимера, свободной поверхностной энергии твердого тела и гибкости полимерной цепи, что и служит главной причиной образования неоднородной структуры клеевого шва, приводящей к изменению трещиностойкости по мере удаления от поверхности подложки. Некоторые результаты испытаний представлены на рис.5 и 6.

Достоверность результатов испытаний ДКБ-образцов проверяли на образце "пузырь под давлением". Удельную энергию продвижения трещины определяли по зависимости: $G = \frac{1}{2}(P \cdot \Delta V / \Delta A - V \Delta \cdot P / \Delta A)$, где ΔV и ΔP - изменение объема и давления жидкости при увеличении площади трещины (A) на величину ΔA ; V, P - объем и давление жидкости в момент отслаивания покрытия от подложки. Величины G_c и G_a вычисляли по формулам:

$$G_c = 4P^2 R G / [P^2 + (P + \Delta P)^2] (2R + \Delta R);$$

$$G_a = [4(P + \Delta P)^2 (R + \Delta R)] G / [P^2 + (P + \Delta P)^2] (2R + \Delta R),$$

где R - радиус зоны отслаивания. В процессе испытаний получали диаграммы объем-давление, а также диаграммы предельного состояния при $\tau < 0$, $\tau > 0$ и определяли размер зоны отслаивания. Характер роста трещин для рассматриваемых композиций такой же, как и при испытании ДКБ-образцов. Причем, для образцов "пузырь под давлением" трещина отслежи-

вала рельеф армирующего материала и проходила вблизи поверхности раздела фаз, а для ДКБ-образцов при $\tau < 0$ трещина отклонялась к армирующему материалу, а при $\tau > 0$ - к поверхности подложки. Это объясняется тем, что при низких скоростях трещины энергия адгезии меньше энергии когезии, и трещина следует вдоль границы раздела, то есть по пути минимального сопротивления, а при высоких скоростях трещины энергия адгезии больше энергии когезии, и поэтому трещина распространяется в клеевую композицию. Установлено, что величина G_I примерно в шесть раз меньше величины G_{II} .

Исследована возможность повышения надежности клевого соединения за счет увеличения сопротивления покрытия отслаиванию, для чего между подложкой и покрытием устанавливали перпендикулярно движению трещины жгуты из антиадгезионного по отношению к покрытию материала. В таком соединении трещина продвигается скачкообразно от одного жгута к другому, то есть затормаживаясь на них. В этом случае трещина выходит на отверстие, образованное жгутом, что приводит к исчезновению трещины как острого разреза и появлению отверстия с конечной величиной напряжения. Эффективность предлагаемого способа заключается в более стабильных экспериментальных данных и в конечном счете в повышении надежности клевого соединения. Жгуты следует располагать в окрестности зон высокой концентрации напряжений, так как они незначительно снижают величину предельной нагрузки, но обеспечивают торможение трещин, зародившихся в зоне этой концентрации. Зависимости величин удельной энергии продвижения трещины и коррозионной энергии разрушения определяли в воде и нефтепродуктах на временной базе $2 \cdot 10^6$ с. Установлено, что величина коррозионной энергии разрушения зависит от уровня адгезионного взаимодействия между подложкой и клеевой композицией. Результаты исследований показали, что на характеристики трещиностойкости клевого соединения существенное влияние оказывает вода, а также эксплуатационно-технологические факторы.

Четвертая глава посвящена исследованию прочности клеевых металло-полимерных соединений при кратковременной и длительной нагрузке, совместном действии нормальных и касательных напряжений в различном диапазоне их соотношений.

Для проведения данных исследований разработаны новая методика испытаний и устройство для определения прочности сцепления клевого соединения, схема нагружения которого обеспечивает равномерное распре-

деление напряжений в адгезионной связи, что повышает точность испытаний, расширяет область применения устройства и диапазон изменения соотношений нормальных и касательных напряжений. В работе выполнен анализ теорий прочности, который позволил сделать вывод, что в исследовании применимости этих теорий к клеявым металлополимерным соединениям следует отдать предпочтение теории О.Мора как чисто экспериментальной, критерию адгезионной прочности А.М.Скудры - Б.А.Курилыса, а также новейшим энергетическим теориям П.П.Баландина, А.И.Боткина, И.Н.Миролюбова, Г.С.Писаренко - А.А.Лебедева и Ю.И.Янга.

Экспериментальные исследования проводились при совместном действии нормальных и касательных напряжений, диапазон соотношений которых составлял $\sigma/\tau=0,5; 1,0$ и $3,0$. Характеристики прочности металлополимерного соединения оценивались как в кратковременном исходном состоянии, так и после предварительных выдержек в течение 25; 50 и 100 часов при нагрузках, равных $0,25 P_{кр}$ и $0,5 P_{кр}$ в зависимости от толщины армированного полимерного слоя, которая составляла 0,5; 1,5 и 2,5 мм. В качестве связующих использовались композиции "ВАК-А" и "Спрут-9М", армирующим материалом являлась стеклоткань марки Т-II-ГВС-9. Результаты выполненных исследований представлены в виде диаграмм предельного напряженного состояния, характер которых близок к эллиптическому. Одна из них представлена на рис.7.

Анализ диаграмм показал снижение исходной кратковременной прочности после малых по времени выдержек, а по мере увеличения времени выдержки - восстановление кратковременной прочности. Кроме того, более слабая прочность при нормальном отрыве и сдвиге клеевой композиции "Спрут-9М" (в сравнении с композицией "ВАК-А") проявилась и в снижении прочности металлополимерного соединения на основе этой композиции при совместном действии нормальных и касательных напряжений. Установлено также, что на прочность такого соединения значительное влияние оказывает толщина армированного полимерного слоя.

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными показало практически полное их совпадение. Показано, что работу металлополимерных соединений можно рассматривать в рамках основных положений третьей теории прочности при обширном наличии экспериментальных данных. Сравнительный анализ диаграмм предельного напряженного состояния показал, что предельные кривые для различных длительностей предварительной нагрузки можно рассматривать как

эквидистантные по отношению к диаграмме предельного напряженного состояния, полученной по результатам кратковременных статических испытаний. Это дает возможность по диаграммам кратковременной прочности описывать диаграммы после различной предварительной наработки. Для этой цели вводится коэффициент a_1 , а оценка эквивалентного напряжения после различной предварительной наработки выполняется по выражению:

$$\sigma_{\text{экв}} = a_1 \cdot \tau \sqrt{n^2 + 4}, \quad \text{где } n = \sigma / \tau, \quad a_1 = \sigma_{\text{экв}} / \sigma_{\text{экв}_0}.$$

Получена зависимость коэффициента a_1 от величины соотношения σ/τ . Установлено, что величина коэффициента a_1 является постоянной для различных соотношений σ/τ , но зависит от толщины армированного полимерного слоя. Причем величина a_1 для полимерного слоя на основе клеевой композиции "ВАК-А" примерно на 10% выше, чем для полимерного слоя "Спрут-9М". Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что рассмотренные диаграммы предельного напряженного состояния могут служить своеобразным эталоном, к достижению которого следует стремиться при разработке новых рецептов клеевых композиций и получении на их основе ПП, а также о принципиальной возможности расчета этих диаграмм по результатам стандартных испытаний на прочность при нормальном отрыве и сдвиге.

В пятой главе рассматривается динамическая прочность и вибростойкость композиционных элементов. Предложены новые методики экспериментального исследования композиционных элементов при динамическом, импульсном и вибрационном воздействии, спроектированы и созданы оригинальные установки для этих целей. Исследования прочности ЭМК с ПП при воздействии ударных нагрузок показали, что повреждение покрытия при падении груза (шара) на композиционный элемент носило локальный характер и происходило по трем видам: а) раздробление и растрескивание клеевой композиции, проявляющиеся в виде темных пятен на материале покрытия со стороны удара, и посветлений - с противоположной, а также образование свободных поверхностей в материале, которые способствуют ускорению его разрушения; б) расслаивание стеклоткани, проявляющееся в виде резкого посветления и потери прозрачности материала покрытия в зоне нанесения удара; в) разрыв волокон стеклоткани, сопровождающийся образованием трещин в материале покрытия в зоне нанесения удара. Получена зависимость между энергией разрушения и

длиной трещины для материала покрытия, а также зависимости σ_u^2 / E и ударной нагрузки P_{max} от высоты падения груза H по основе и по утку, где

$$H = A\sigma_u^2 \cdot \delta / E; \quad P_{max} / mg = 1 + \sqrt{1 + 2H \cdot a / mg}.$$

Исследования показали, что механические свойства материала покрытия за пределами пятна контакта с шаром не изменились, а энергия удара в материале покрытия концентрируется в пределах круга с радиусом, не превышающим диаметра шара. Причем разрушение элементов в этом случае сопровождалось нарушением когезионных и адгезионных свойств между клеевой композицией и армирующим материалом, а также расщеплением волокон стеклоткани. Выше изложенное подтверждено результатами испытания на разрыв образцов, вырезанных из участков испытанных элементов из ПП, так как предел прочности материала покрытия, находящегося в зоне удара и удаленного от него, практически не изменился. Установлено, что поведение покрытия при ударе определяется упругим поведением волокон стеклоткани; причем нарушение связи между волокном и клеевой композицией сильно препятствует энергии удара, благодаря появлению расслаивания. Зона видимых изменений в структуре материала покрытия вписывается в окружность шара. Развитие трещин после нанесения удара не наблюдается. Расслаивание материала при ударе происходит как вследствие отделения клеевой композиции от волокон стеклоткани, так и вследствие разрушения композиции, что позволяет считать прочность композиции при скальвании по слою и силы сцепления ее с волокнами стеклоткани величинами примерно одного порядка. Выявлено, что энергия удара нелинейно зависит от толщины ПП, и способность к поглощению удара этих покрытий строго ограничена. Причем жесткость клеевой композиции не оказывает существенного влияния на степень поглощения энергии удара, а при повреждении полимерного материала происходит разрушение волокон стеклоткани, их вытягивание. Влияние импульсных нагрузок на прочность композиционных элементов исследовано, исходя из представлений о продуктах детонации газовой смеси $2H_2 + O_2$ как реагирующей среде, имеющей в каждой точке равновесный химический состав, рассчитаны параметры цилиндрической ударной волны и проведено сравнение с экспериментальными данными. Расчет выполнен по методике, разработанной С.А.Жданом в предположении, что цилиндр радиусом r заполнен газовой смесью водорода с кислородом плотностью ρ_1 , а между смесью и испытуемым композиционным элементом находится жидкость с начальным давлением P_0 и плотностью ρ_0 . При инициировании

вдоль оси симметрии цилиндра по газовой смеси будет распространяться цилиндрическая детонационная волна. Начиная с момента выхода ее на границу раздела газовая смесь-жидкость, задача описывается известной системой одномерных нестационарных уравнений газовой динамики. Величину полной энергии, заключенной в реагирующей газовой смеси водорода с кислородом в момент выхода детонационной волны через отверстие в перегородках на границу с жидкостью, определяли из выражения:

$$W = \frac{2\pi v}{v+1} \int_0^{\lambda} \rho \left(U + \frac{u^2}{2} \right) dr^{v+1} = \frac{2\pi v}{v+1} \rho_1 U_0 r_0^{v+1},$$

где $U_0 = P_0 / (\gamma_1 - 1) \rho_1 + U_{cp} (1 / \mu_1 - 1 / \mu_{max})$ - полная начальная энергия на 1 кг газовой смеси. Получена зависимость избыточного давления ΔP на фронте ударной волны от безразмерного расстояния $\lambda_\phi = r_\phi / r_0$ и зависимость безразмерного импульса $J_p^* = \bar{J}_p^* / r_0 \sqrt{P_0 \cdot \rho_0}$ на фронте ударной волны от относительного расстояния $\lambda = r / r_0$. Причем расчетные данные неплохо коррелируются с экспериментальными.

Известно, что величина коэффициента полезного действия взрыва определяется как отношение энергии U , перешедшей в ударную волну при максимальном расширении продуктов детонации газовой смеси, к полной начальной энергии U_0 , заключенной первоначально в смеси, то есть $\eta = 1 - U / U_0$. Исследования установили, что для газовой смеси $2H_2 + O_2$ $\eta = 30\%$, то есть для данной смеси только примерно третья часть полной энергии взрыва совершает работу над окружающей жидкостью, расположенной между смесью и испытуемым элементом.

Выполнены экспериментальные исследования зависимости критических напряжений сдвига на фронте ударной волны в композиционном элементе типа металл-ПП от величины давления ударного сжатия в диапазоне до 40 атм. Для определения сдвига τ при импульсной нагрузке использовался метод непосредственной регистрации, то есть τ определяли разностью напряжений, действующих по нормали (σ_1) и параллельно (σ_2) фронту ударной волны. Получена зависимость напряжений сдвига от гидростатического давления, которая установила, что с ростом P в ударной волне величина τ при импульсных нагрузках, вызванных детонацией газовой смеси, линейно возрастает.

Исследование влияния вибрационных нагрузок на прочность ПП установило способность покрытия поглощать вибрацию за счет явления

внутреннего деформирования, то есть материал покрытия поглощает энергию вибрации путем преобразования ее в тепло за счет внутреннего трения. Вследствие того, что листовые элементы подвергались воздействию вибрационных нагрузок в направлении, нормальном к плоскости элемента (элементы располагались горизонтально), под действием сил тяжести развивались остаточные прогибы, составившие в центре элемента к концу испытаний 10 мм. Визуальный просмотр с помощью лупы 20-кратного увеличения материала листовых элементов показал, что после испытания на вибрационную нагрузку не было обнаружено трещин, расслаивания стеклоткани и растрескивания клеевой композиции, а также нарушения связи между стеклянными волокнами и клеевой композицией. Результаты испытаний образцов на разрыв, вырезанных из участков элементов, показали, что предел прочности "отработавшего" материала, подвергнутого $10,5 \cdot 10^6$ циклам, в сравнении с пределом прочности "неработавшего" материала снизился по основе и по утку примерно на 8 - 11%. Причем частота свободных колебаний была практически одинакова для всех испытанных элементов и равнялась 34 Гц, что удовлетворительно совпадает со значениями, определенными аналитическим путем.

Глава шестая посвящена исследованию многофункциональности ПП, нанесенных на ЭМК. Исследована возможность повышения характеристик прочности полимерного покрытия путем армирования его металлическими пластинами на воздухе, под водой и в нефти, а также адгезионная прочность покрытия по отношению к металлу и влияние армирования на механические свойства покрытия. Показано, что величина адгезии между металлом и покрытием зависит от характеристик прочности клеевых композиций. Так как ПП могут эксплуатироваться во влажных средах, были сняты показатели их характеристик прочности после трехчасового кипения в воде и после 150 суточного пребывания в морской воде. Испытания показали, что величина адгезии при сдвиге снижается при армировании сталью примерно на 4 и 8% соответственно. Для определения рациональных схем армирования покрытия металлом было проведено несколько типов армирования, различающихся толщиной металла и расположением пластин из стали ВМ Ст. 3 сп с сплава АМг в ПП. Найдены рациональные схемы армирования и распределения их жесткостей, обеспечивающие повышение несущей способности металлополимерных элементов при снижении веса.

Исследования адгезии льда к металлу и ПП показали, что одним из главных требований, предъявляемых к покрытиям, является получение

минимального значения силы сцепления льда с защищаемой поверхностью. Причем усилие отрыва определяется механическими и молекулярными силами, характеризует способность материала покрытия быть использованным в качестве защитного от обледенения металлических элементов. Получены зависимости адгезии льда к металлу и полимерным покрытиям от солености воды и величины шероховатости поверхности. Установлено, что с увеличением солености воды и величины шероховатости адгезия льда к металлу и покрытию уменьшается и увеличивается соответственно. Показано, что для исследуемых полимерных покрытий эти зависимости близки к линейным. Результаты испытаний позволили выявить возможность применения покрытий для защиты от воздействия льда.

С целью имитации климатических факторов композиционные элементы исследовались на влагоустойчивость, холодоустойчивость, теплоустойчивость и циклическое воздействие температур, а затем испытывались на сдвиг и нормальный отрыв. Для испытания на влагоустойчивость элементы помещали в камеру с температурой 323К, где они подвергались воздействию влаги и тепла по следующему режиму: влажность 100%, температура камеры 323К, продолжительность испытаний 15 часов, затем снижали температуру до 293К, влажность до 90%, продолжительность выдержки до 10 часов. Общее время пребывания элемента в камере составило 75 часов. Для определения циклического воздействия температур элементы помещали в камеру с температурой 223К и выдерживали в ней в течение 3 часов. Затем элементы вынимали из камеры и доводили до температуры окружающей среды (293К), после чего их снова помещали в камеру с температурой 323К и выдерживали в ней в течение 3 часов. Всего было 10 таких циклов. Для испытания на теплоустойчивость элементы помещали в камеру с температурой 313К, выдерживали в ней в течение 3 часов, затем температуру повышали до 333К и элементы выдерживали еще 3 часа, затем температуру снова повышали до 353К и выдерживали их еще 3 часа. Для определения холодоустойчивости элементы помещали в камеру с температурой 233К, выдерживали в ней в течение 3 часов, затем температуру понижали до 213К и элементы выдерживали еще 3 часа, затем температуру снова понижали до 199К и выдерживали их еще 3 часа. Визуальным осмотром никаких изменений металлополимерного материала не обнаружено. Исследования показали, что характеристики прочности металлополимерных элементов после воздействия на них климатических

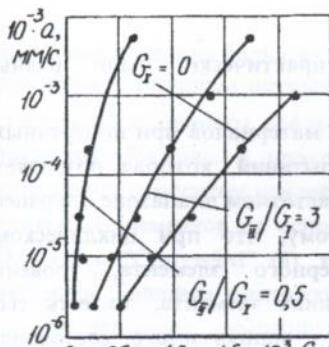


Рис. 5. Характерные диаграммы докритического разрушения.

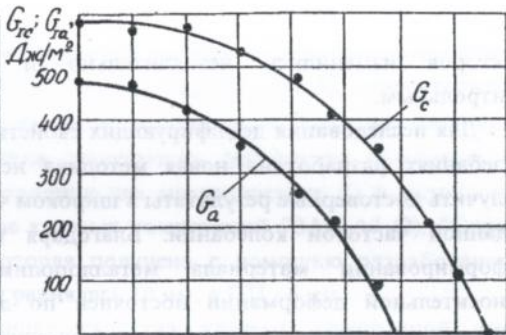


Рис. 6. Характерные диаграммы предельного состояния.

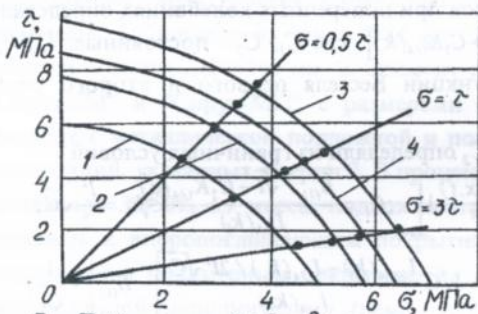


Рис. 7. Нагрузка $0,5 P_{кр}$; $\delta_n = 2,5$ мм; Клеевая композиция, Спрут-9М; Время выдержки: 1-25; 2-50; 3-100 часов; 4-кратковременно.

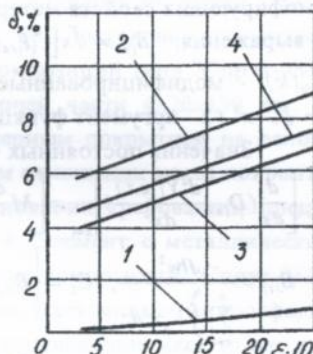


Рис. 8. Зависимость декремента колебаний от амплитуды относительной деформации.

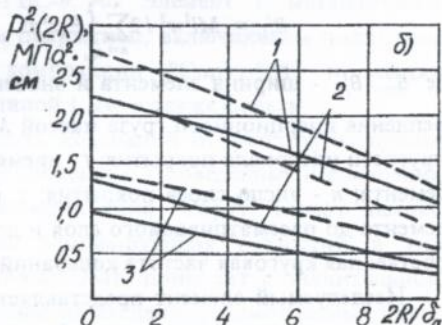
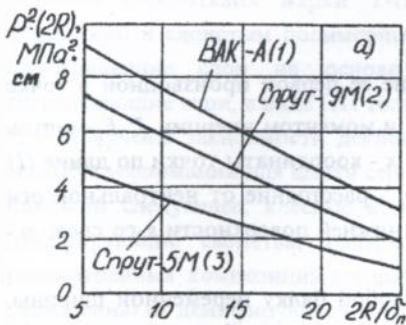


Рис. 9. Зависимость разрушающего гидростатического давления от диаметра отверстия и толщины покрытия для кратковременной (а) и длительной (б) нагрузок: — — — — — давление водной; - - - - - нефтепродуктами.

факторов изменились незначительно и практически были равны контрольным.

Для исследования демпфирующих свойств материалов при поперечных колебаниях разработана новая методика испытаний, которая позволяет получить достоверные результаты в широком частотном диапазоне с заранее заданной частотой колебаний. Благодаря тому, что при циклическом деформировании материала металлополимерного элемента, уровень относительной деформации постоянен по длине элемента, то есть его материал находится в условиях однородного напряженного состояния, показатели демпфирующей способности характеризуют истинное рассеяние энергии в материале. Ширину листового элемента для исследования демпфирующих свойств материалов при поперечных колебаниях определяли из выражения: $B_{(x)} = \sqrt{x} [C_1 I_{1/4}(k) + C_2 K_{1/4}(k)]$, где C_1, C_2 - постоянные; $I_{1/4}(k), K_{1/4}(k)$ - модифицированные функции Бесселя первого и второго рода; $k = \sqrt{C} \cdot x^2 / 2$ - аргумент функции.

Значения постоянных C_1, C_2 определяли из граничных условий

$$\left[\frac{d}{dx} (D_{(x)} \frac{d^2 Y(x,t)}{dx^2}) \right]_{x=l} = \left[M \frac{d^2 Y(x,t)}{dt^2} \right]_{x=l}; C_1 = \frac{B_{(l)}}{I_{1/4}(k_l)} \sqrt{l - C_2 K_{1/4}(k_l)}; C_2 = \frac{l^2}{2} \sqrt{C};$$

$$B_{(l)} = \frac{J l w^2}{\sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} E_n z^2 dz}; C_2 = \left\{ B_{(l)} \left[\frac{1}{2l} + l \sqrt{C} \frac{I_{-3/4}(k_l) - I_{1/4}(k_l) / 2l^2 \sqrt{C}}{I_{1/4}(k_l)} \right] - B_{(l)}' \right\} \cdot \frac{1}{C_3};$$

$$C_3 = l \sqrt{C} \left\{ \frac{K_{1/4}(k_l)}{I_{1/4}(k_l)} \left[I_{-3/4}(k_l) - \frac{I_{1/4}(k_l)}{2l^2 \sqrt{C}} \right] + K_{-3/4}(k_l) + \frac{K_{1/4}(k_l)}{2l^2 \sqrt{C}} \right\};$$

$$B_{(l)}' = -M l^2 w^2 / 2 \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} E_n z^2 dz,$$

где $B_{(l)}, B_{(l)}'$ - ширина элемента и значение ее первой производной в точке крепления инерционного груза массой M и моментом инерции J ; E_n - модуль упругости материала покрытия; t - время; x - координаты точки по длине (l) элемента; n - число слоев покрытия; z, h_k - расстояние от нейтральной оси элемента до рассматриваемого слоя и до нижней поверхности k -го слоя; ω - собственная круговая частота колебаний.

Исследуемый элемент представляет собой балку переменной ширины, консольно закрепленную широкой частью к массивной плите так, чтобы исключить сток энергии в заделке. На свободном конце балки закрепляется инерционный груз. Установлено распределение напряжений на поверхности

подложки по длине балки на резонансной частоте и получено соотношение для выбора толщины покрытия $\delta_n / \delta_M = (1 - K_0) / K_0$, где K_0 - характеризует степень однородности деформируемого состояния по толщине материала покрытия. На рис. 8 приведена зависимость декремента колебаний от амплитуды относительной деформации для металлических (1) и металлополимерных элементов на основе клеевых композиций "ВАК-А" (2), "Спрут-5М" (3) и "Спрут-9М" (4), которая получена с помощью разработанной методики. Толщина подложки равнялась 10 мм, а ПП - 6 мм.

Исследованы демпфирующие свойства клеевых композиций типа "Спрут" и определена эффективность применения ПП на их основе для повышения демпфирующей способности листовых ЭМК. Исследования по определению характеристик демпфирования проводились на шести сериях элементов. 1. Элемент из стали ВМ Ст. 3 сп без покрытия с размерами рабочей области 2×20×190 мм. 2. Элемент из композиций типа "Спрут-9М", "Спрут-5М" и "Спрут-МП" с размерами рабочей части 4×20×190 мм. 3. Элемент с металлической подложкой и полимерным покрытием на основе композиций, указанных в серии 2. В процентном отношении масса покрытия составляла 30-50% от массы подложки на основании требований, предъявляемых к вибропоглощающим покрытиям. 4. Элемент с металлической подложкой и полимерным покрытием на основе композиции "Спрут-9М", армированной наполнителями (цемент, графит, стеклянные микросферы, алюминиевая и бронзовая пудра). Процентное соотношение масс то же, что и в серии 3.5. Элемент с металлической подложкой и ПП со строчной схемой армирования на основе композиции "Спрут-9М". Армирующим материалом являлась стеклоткань марки Т-II-ГВС-9. 6. Элемент с металлической подложкой и слоистым полимерным покрытием, включающим податливые сдерживающие слои на основе композиции "Спрут-9М" и жесткие сдерживающие слои, в виде ПП толщиной 1 мм, а также фольги.

Получены зависимости декремента колебаний от амплитуды относительной деформации для шести серий элементов. Проведенные исследования показали следующее: клеевые композиции типа "Спрут" имеют высокие демпфирующие свойства; нанесение демпфирующих покрытий в виде рассмотренных композиций на листовые ЭМК приводит к значительному увеличению их демпфирующей способности; введение рассмотренных наполнителей в композицию в пропорции 30-50% ее массы снижает декремент колебаний элементов с покрытием в среднем в два раза; особенно эффективны покрытия на основе конструктивных композиций "Спрут-5М" и

"Спрут-9М" при отношении массы покрытия к массе металлической конструкции, равном 30%; демпфирующие покрытия на основе композиций с предохраняющими слоями из армированного полимерного материала целесообразно применять только для снижения уровня колебаний листовых металлических конструкций, подверженных механическому воздействию (например, конструктивные элементы на судах).

В седьмой главе на основании выполненных комплексных исследований разработаны конструкции, технология изготовления металлополимерных элементов и типовые схемы ПиВНС ЭМК и ДМ с применением ПП; условия и требования, необходимые для создания прочных металлополимерных материалов; принципы работы нового технологического оборудования для обработки корпуса судна, шахтных стволов и акустико-эмиссионного контроля листовых материалов; новые методы ПиВНС ЭМК, в том числе корпусно-емкостного оборудования. Кроме того, для рыбопромысловых судов дается перечень систематизированных ЭМК и ДМ, на которые целесообразно наносить ПП в целях защиты и восстановления, рассмотрена эффективность применения этих покрытий на примере судоремонта.

Предлагаемая работа в системе рекомендаций нанесения ПП на ЭМК и ДМ включает три вида работ. Два из них носят профилактический характер и выполняются в целях снижения коррозионных повреждений в процессе последующей эксплуатации, а третий - для ПиВНС поврежденных изделий.

Условия и требования, необходимые для создания прочных металлополимерных материалов, которым должны удовлетворять клеящие композиции и ПП на их основе, используемые при формировании этих материалов, разработаны с учетом обеспечения надежной защиты адгезионной связи покрытия с металлом, эксплуатационно-технологических факторов и оценкой предельного состояния по этому параметру.

Новое технологическое оборудование и новые методы разработаны в основном для механизации трудоемких работ, повышения производительности труда, сокращения расходных материалов, расширения технологических возможностей и областей применения и обеспечения высокого качества ремонтных работ.

Для определения влияния ПП и накладного металлического элемента на напряженное состояние основного металлического элемента были выполнены исследования на изгиб и растяжение. Установлен уровень распределения в сжатых и растянутых волокнах основного и накладного элементов. Произведена оценка прочности металлополимерного элемента с

заклепкой и без нее, которая показала, что в элементе с заклепкой разрушение не наступало при нагрузке, вызывающей напряжение текучести в материале основного элемента, а в элементе без заклепки отслоение накладного элемента от основного начиналось при напряжении в основном элементе 220 МПа. Выявлено, что заклепка решает две задачи: во-первых, работая на срез, снижает напряжения в клеевом соединении и способствует вовлечению в работу накладного элемента; во-вторых, в процессе формирования трехслойного элемента обеспечивает сжатие накладного и основного элементов, то есть дает возможность получить клеевой слой минимальной толщины, что увеличивает прочность и жесткость конструкции. Получены зависимости удельной разрушающей нагрузки от периметра отверстия, заформованного покрытием, при испытании металло-полимерных элементов на гидростатическое давление и локальную нагрузку, а также ударной энергии разрушения от количества слоев армирующего материала. Установлена зависимость жесткостей от соотношения толщин покрытия и металла при изгибе и растяжении этих элементов, а также зависимость разрушающего гидростатического давления от диаметра отверстия и толщины ПП (рис.9) для кратковременной нагрузки с $K_3 = 2,0$ и для длительной - $K_3 = 1,75$.

Исследования показали, что целесообразно использовать при ПиВНС листовых конструкций установку накладного элемента толщиной, равной сверхнормативному износу основного элемента и перекрытием зоны износа не менее чем на 100 мм, а ПП при восстановлении локальной прочности и жесткости поврежденных конструкций.

Результаты выполненных исследований, а также опыт применения ПП в различных отраслях народного хозяйства установили, что при правильной эксплуатации, своевременной профилактике и ремонте надежность ЭМК и ДМ поддерживается на заданном уровне длительное время, нередко во много раз превышающее гарантийные сроки.

В приложение включены копии актов внедрения результатов настоящего исследования. Осмотры восстановленных ПП изделий, которые регулярно проводились на протяжении ряда лет, показали, что изделия находятся в хорошем состоянии и не нуждаются в замене. Наблюдения подтвердили результаты комплексных исследований, выполненных в работе. Установлено, что покрытие прочно удерживается на металлической поверхности и дальнейшая коррозия под ним не наблюдается.

Восстановленные с применением ПП изделия не изменили свою локальную прочность, жесткость и герметичность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе поставлена и решена научная проблема, имеющая важное народнохозяйственное значение, заключающееся в разработке научно-обоснованных способов упрочнения элементов металлических конструкций полимерными армированными покрытиями.

Основные результаты выполненного исследования сводятся к следующему:

1. Дано теоретическое, экспериментальное и технико-экономическое обоснование эффективности использования полимерных армированных покрытий с целью повышения несущей способности многих металлических конструкций. Разработан новый экспериментально-расчетный метод оценки прочности таких изделий с учетом особенностей технологии их изготовления, послужившей базой для создания целого ряда нормативно-технических документов по применению армированных покрытий в различных отраслях народного хозяйства.

2. Разработаны новые эффективные методы механических испытаний металлополимерных клеевых материалов, созданы соответствующие оригинальные установки, моделирующие условия, максимально приближенные к реальным, получены новые данные о характеристиках прочности этих материалов в условиях статического и динамического нагружения (а.с. 974226, 993079, 1037149, 1056714, 1077448, 1169430, 1552057, 1357801, 1548696).

3. Выполнена сравнительная оценка кратковременной и длительной прочности металлополимерных клеевых соединений при различных соотношениях нормальных и касательных напряжений; получены диаграммы предельного напряженного состояния клеевых соединений при кратковременной и длительной статической нагрузке и установлено, что общие принципы оценки работоспособности однородных материалов в условиях сложного напряженного состояния применимы и для таких сложных объектов, как клеевые металлополимерные соединения, а диаграммы предельных состояний могут быть использованы при разработке новых рецептур клеевых композиций.

4. Выполнены специальные исследования влияния состояния металлической поверхности и наполнителей на характеристики прочности

клеевых металлополимерных элементов, позволившие обосновать применительно к заданным условиям эксплуатации оптимальный, с точки зрения прочности, способ обработки поверхностей и оптимальное содержание наполнителя в клеевой композиции, соответствующее точке когезионно-адгезионного перехода.

5. Установлена зависимость характеристик трещиностойкости металлополимерных клеевых соединений в условиях кратковременного и длительного статического нагружения от вида напряженного состояния в вершине трещины нормального отрыва и поперечного сдвига с учетом эксплуатационно-технологических факторов. Показано, что локальные релаксационные процессы нелинейного вязкоупругого деформирования, протекающие в межглобулярных дефектных областях отвержденных клеевых композиций, в значительной степени определяют стойкость соединения к росту трещин. Предложен новый способ определения (а.с.1111063, 1529072) характеристик трещиностойкости металлополимерных клеевых соединений и установлена степень влияния воды и нефтепродуктов на эти характеристики.

6. Разработана новая методика исследования (а.с. 1363004, 1536256, 1718023) и изучена демпфирующая способность полимерных покрытий, нанесенных на листовые металлические элементы. Установлено, что эти покрытия можно эффективно использовать для снижения динамической напряженности и повышения усталостной прочности несущего слоя. Показано, что демпфирование оказывает непосредственное влияние на характер вибрации материала: значительно уменьшает частоту собственных колебаний и, что более важно, снижает амплитуду колебаний при частотах, близких к резонансным.

7. Расчетным методом определена рациональная схема соединения несущих слоев в трехслойной конструкции с принципиально новым типом соединений слоев (а.с. 1066882). Выполнен анализ степени влияния жесткости элементов соединения на напряженно-деформированное состояние и несущую способность трехслойных конструкций с полимерным покрытием. Оценка напряженно-деформированного состояния трехслойных конструкций методом конечных элементов создала основу

для рационального проектирования, выбора технологии изготовления и сборки этих конструкций.

8. На основе анализа причин и закономерностей коррозии элементов металлических конструкций в процессе их эксплуатации выполнена систематизация типовых элементов и разработаны мероприятия по устранению разупрочнения элементов от коррозии, а также предусмотрены технические решения на стадии проектирования конструкций, ограничивающие разупрочнение, что позволило значительно повысить эксплуатационные характеристики и увеличить срок службы изделий.

9. На базе изучения механизма деформирования, разрушения адгезионной прочности и натурных исследований впервые разработаны принципиально новые методы повышения и восстановления несущей способности корпусно-емкостного оборудования (а.с. 529201) и силовых конструкций (а.с. 1011440, 1742122, 1796533), которые позволяют повысить качество ремонта, уменьшить расход металла, снизить трудоемкость восстановительных работ и сократить их срок, проводить ремонтные работы подводной части различных объектов без их постановки в док.

10. С целью реализации результатов исследования впервые разработано новое технологическое оборудование для обработки корпуса судна (а.с. 943092, 1043069, 1054204), шахтных подъемных комплексов (а.с. 937724) и контроля качества материалов (а.с. 1027603). Техничко-экономические преимущества разработанного оборудования в сравнении с существующим заключается в расширении технологических возможностей и областей применения, упрощения конструкции, повышении производительности труда, сокращении расхода материалов и снижении трудоемкости работ.

11. Результаты комплексных исследований нашли широкое применение в конструкторско-технологической практике для оценки несущей способности элементов металлических конструкций, упрочненных полимерными покрытиями. Рассмотрена эффективность применения полимерных покрытий на примере судоремонта, которая наглядно показала целесообразность их использования и необходимость широкого внедрения разработанных методов. Внедрение в различных отраслях народного хозяйства полимерных покрытий позволило свести к минимуму объем ремонтных работ путем замены и получить экономический эффект в сумме 1,23 млн.руб. (в ценах 1990 года).

Основные результаты исследований, представленных в диссертации, опубликованы в следующих работах:

1. Корягин С.И., Розендент Б.Я. Стеклопластик в судоремонте. - Калининград: Кн. изд-во. - 1979. -111 с.
2. Корягин С.И. Применение полимерных материалов при ремонте судовых конструкций и деталей механизмов рыбопромысловых судов // Учебное пособие. - Калининград: ВИПК руководящих работников и специалистов рыбной промышленности и хозяйства. - 1982. - 131 с.
3. Корягин С.И., Розендент Б.Я. Применение стеклопластиков при ремонте корпусных конструкций // Обзорная информация. - М.: ЦНИИТЭИРХ. - 1979. - вып. 2. - 36 с.
4. Применение армированных полимерных покрытий при ремонте элементов корпусных конструкций и оборудования промысловых судов / С.В.Буйлов, С.И.Корягин, Б.А.Ляшенко и др. // Доклад на VI НТК по развитию флота рыбной промышленности и промышленного рыболовства социалистических стран - членов СЭВ. - Л.: Судостроение. - 1984. - 16 с.
5. Корягин С.И., Дробышев А.Г. Установка для испытания пластин на знакопеременный изгиб // Заводская лаборатория. - 1976. - т.42. - № 12. - с. 1515.
6. Корягин С.И., Лавров В.П. Установка для испытания пластин на вибрационную нагрузку // Заводская лаборатория. - 1977. - т.43. - № 9. - с. 1150-1152.
7. Корягин С.И., Дробышев А.Г. Установка для усталостных испытаний пластин на растяжение // Сб. трудов НТО им.акад.А.Н.Крылова. - Л.: Судостроение. - 1977. -вып. 261. - с. 90-95.
8. Корягин С.И., Шалюхин Ю.Н., Розендент Б.Я. Изгиб и растяжение двухслойных образцов // Пластические массы. - 1981. - № 4. - с. 33-34.
9. Корягин С.И., Ляшенко Б.А., Веселовский Р.А. Механические свойства композиционных материалов типа металл-стеклопластик // Судоремонт флота рыбной промышленности. - 1981. - № 45. - с. 33-35.
10. Корягин С.И. Исследование коэффициента концентрации напряжений в листовом элементе около круглого отверстия, заформованного пластиком // Судоремонт флота рыбной промышленности. - 1981. -№ 46. - с. 31-32.
11. Корягин С.И. Исследование прочности металлических образцов с покрытием из стеклопластика при изгибе // Сб. трудов КТИРПиХ. - Калининград: изд-во "Калининградская правда". - 1981. - вып. 96. - с. 54-61.
12. Корягин С.И. Прочностные свойства клеевых композиций, применяемых для защиты и восстановления работоспособности

металлических конструктивных элементов // В кн.: "Снижение объема ремонта корпусов судов". - Калининград. - 1984. - с. 63-68.

13. Свойства стеклопластиков, армированных металлом / С.И.Корягин, Б.А.Ляшенко, Р.А.Веселовский и др. // Судоремонт флота рыбной промышленности. - 1982. - № 48. - с. 34-36.

14. Корягин С.И. Зависимость радиальных напряжений от соотношения толщины основы и покрытия // Пластические массы. - 1985. - № 3. - с. 28-29.

15. Корягин С.И. Исследование прочности элементов корпусных конструкций с армированным полимерным покрытием // Судоремонт флота рыбной промышленности. - 1985. - № 57. - с. 34-35.

16. Буйлов С.В., Корягин С.И., Веселовский Р.А. Влияние воды и нефтепродуктов на адгезионную прочность армированных полимерных покрытий // Судоремонт флота рыбной промышленности. - 1985. - № 58. - с. 39-40.

17. Буйлов С.В., Дятченко С.В., Корягин С.И. Влияние наполнителей на прочностные характеристики клеев // Пластические массы. - 1985. - № 7. - с. 58.

18. Корягин С.И., Власенко Е.А. Оценка прочности соединения металлических элементов армированным полимерным слоем при сложном нагружении // Изв. ВУЗов МВ и ССО "Машиностроение". - 1985. - № 10. - с. 11-14.

19. Корягин С.И., Манец И.Г. Исследование прочности листовых элементов из армированного полимерного покрытия при действии равномерно распределенной нагрузки // Вестник машиностроения. - 1985. - № 11. - с. 42-43.

20. Корягин С.И. Влияние способа обработки металлической поверхности на прочность клеевых соединений // Вестник машиностроения. - 1986. - № 1. - с. 43-44.

21. Дятченко С.В., Корягин С.И., Яковлев А.П. Демпфирующие свойства листовых материалов с нанесенными армированными полимерными покрытиями // Проблемы прочности. - 1986. - № 4. - с. 114-118.

22. Корягин С.И. Исследование прочности армированного полимерного покрытия с подложкой при изгибе и растяжении // Изв. ВУЗов МВ и ССО "Машиностроение". - 1986. - № 10. - с. 3-9.

23. Буйлов С.В., Корягин С.И., Ляшенко Б.А. Исследование трещиностойкости клеевых соединений // Проблемы прочности. - 1987. - № 3. - с. 52-56.

24. Корягин С.И. Влияние вибрационных нагрузок на прочность материала листовых элементов из армированного полимерного покрытия // Проблемы прочности. - 1987. - № 4. - с. 120-121.
25. Таирян Ш.С., Корягин С.И., Буйлов С.В. Прибор для определения силы сцепления покрытия с жесткой подложкой // Промышленность, строительство и архитектура Армении. - 1987: №3. - с. 54-55.
26. Корягин С.И., Власенко Е.А. Об эффекте восстановления прочности клеевых соединений под действием статической нагрузки // Изв. ВУЗов МВ и ССО "Машиностроение". - 1987. - № 6. - с. 6-11.
27. Буйлов С.В., Корягин С.И. Метод определения трещиностойкости клеевых соединений // Заводская лаборатория. - 1988. - т. 54. - № 4. - с. 81-83.
28. Корягин С.И., Буйлов С.В., Сасункевич В.П. Исследование трещиностойкости клеевых соединений при кратковременном статическом нагружении // Изв. ВУЗов МВ и ССО "Машиностроение". - 1987. - № 10. - с. 7-11.
29. Буйлов С.В., Корягин С.И. Метод исследования стабильного роста трещин в клеевых соединениях // Заводская лаборатория. - 1988. - т. 54. - №12. - с. 89-91.
30. Корягин С.И., Буйлов С.В. Оценка характеристик трещиностойкости клеевых соединений // Вестник машиностроения. - 1989. - № 5. - с. 23-26.
31. К методике определения динамических характеристик материалов демпфирующих покрытий / С.В.Буйлов, С.И.Корягин, А.П.Яковлев и др. // Проблемы прочности. - 1988. - № 11. - с. 115-117.
32. А.с. 529201 СССР. Способ ремонта корпусно-емкостного оборудования / Р.А.Веселовский, Ю.К.Значков, С.И.Корягин и др. // Б.и. - 1976. - № 35.
33. А.с. 937724 СССР. Подвесной полок для технического обслуживания и ремонта шахтного ствола / И.Г.Манец, С.И.Корягин, В.Ю.Алексеев // Б.и. - 1982. - № 23.
34. А.с. 943092 СССР. Устройство для нанесения покрытия на корпус судна / С.И.Корягин, А.И.Симхес, В.К.Худяков // Б.и. - 1982. - № 26.
35. А.с. 974226 СССР. Образец для определения прочности сцепления полимерных покрытий с подложкой / С.В.Буйлов, С.И.Корягин // Б.и. - 1982. - № 42.

36. А.с. 993079 СССР. Установка для испытаний объектов на воздействие ударной нагрузки / С.В.Буйлов, С.И.Корягин, Б.А.Ляшенко и др. // Б.и. - 1983. - № 4.
37. А.с. 1011440 СССР. Способ ремонта корпуса судна / С.И.Корягин, С.В.Буйлов, Б.И.Расторгуев и др. // Б.и. - 1983. - № 14.
38. А.с. 1027603 СССР. Устройство для акустико-эмиссионного контроля листовых материалов / С.В.Буйлов, С.И.Корягин, В.К.Худяков // Б.и. - 1982. - № 25.
39. А.с. 1056714 СССР. Установка для ударных испытаний изделий. /С.В.Буйлов, С.И.Корягин, Б.А.Ляшенко и др. //Б.и. - 1983. - № 8.
40. А.с. 1043069 СССР. Устройство для окраски корпуса судна / С.И.Корягин, В.К.Худяков, Б.И.Расторгуев // Б.и. - 1983. - № 35.
41. А.с. 1037149 СССР. Устройство для определения прочности сцепления покрытия с подложкой при отслаивании / С.В.Буйлов, С.И.Корягин // Б.и. - 1983. - № 31.
42. А.с. 1054204 СССР. Устройство для подводной очистки корпуса судна / С.И.Корягин, А.И.Симхес, В.К.Худяков и др. // Б.и. - 1983. - № 42.
43. А.с. 1077448 СССР. Устройство для испытаний изделий на ударное воздействие / С.В.Буйлов, С.И.Корягин, Б.А.Ляшенко и др. // Б.и. - 1984. - № 28.
44. А.с. 1066882 СССР. Конструктивный элемент для ремонта корпуса судна / С.И.Корягин, С.В.Буйлов, Б.И.Расторгуев и др. // Б.и. - 1984. - № 2.
45. А.с. 1111063 СССР. Способ испытания клеевого соединения на трещиностойкость / С.В.Буйлов, С.И.Корягин // Б.и. - 1984. - № 32.
46. А.с. 1169430 СССР. Установка для динамических испытаний изделий / С.В.Буйлов, С.И.Корягин, Б.А.Ляшенко и др. // Б.и. - 1985. - № 10.
47. А.с. 1357801 СССР. Способ определения прочности адгезионного соединения / С.В.Буйлов, С.В.Дятченко, С.И.Корягин // Б.и. - 1987. - № 45.
48. А.с. 1363004 СССР. Способ исследования демпфирующих свойств материалов при поперечных колебаниях / С.В.Буйлов, С.И.Корягин, А.П.Яковлев и др. // Б.и. - 1987. - № 48.
49. А.с. 1529072 СССР. Способ испытания клеевого соединения на трещиностойкость / С.В.Буйлов, С.И.Корягин // Б.и. - 1989. - № 46.
50. А.с. 1548696 СССР. Образец для определения адгезионной прочности / С.В.Буйлов, Е.А.Власенко, С.И.Корягин и др. // Б.и. - 1990. - № 9.

51. А.с. 1536256 СССР. Способ определения декремента колебаний низко модульного материала при изгибных колебаниях / С.В.Буйлов, С.И.Корягин, А.П.Яковлев и др. // Б.и. - 1990. - № 2.

52. А.с. 1552057 СССР. Способ испытания соединения на сдвиг / С.В.Буйлов, С.И.Корягин // Б.и. - 1990. - № 11.

53. А.с. 1718023 СССР. Способ исследования демпфирующих свойств материалов со слоями покрытия при поперечных колебаниях / С.В.Буйлов, Д.Г.Горянский, С.И.Корягин // Б.и. - 1992. - № 9.

54. А.с. 1742122 СССР. Способ ремонта судовой корпусной конструкции / С.В.Буйлов, С.И.Корягин, Б.И.Расторгуев // Б.и. - 1992. - № 23.

55. А.с. 1796533 СССР. Способ ремонта корпуса судна / С.В.Буйлов, Д.И.Горянский, С.И.Корягин // Б.и. - 1993. - № 7.

56. Корягин С.И. Несущая способность металлических конструктивных элементов с многофункциональным полимерным покрытием // Тезисы докладов I Уральской конференции НТК "Применение композиционных материалов на полимерной и металлической матрицах в машиностроении". - Уфа. - 1982. - с. 51-52.

57. Корягин С.И., Буйлов С.В., Шабанов А.Ф. Трещиностойкость клеевых соединений при сложном напряженном состоянии // Тезисы докладов V Всесоюзного симпозиума по механике конструкций из композиционных материалов. - Миасс. - 1986. - с. 43-44.



Корягин С.И. Научные основы обеспечения несущей способности металлических конструкций, упрочненных армированными полимерными покрытиями. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.09. Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры, Ин-т проблем прочности НАН Украины, Киев, 1995.

Защищается 57 научных работ, содержащих результаты исследований влияния технологии, условий эксплуатации и других факторов на несущую способность металлических конструкций с полимерными покрытиями. Разработана научная методология создания металлических конструкций, упрочненных полимерными покрытиями. Результаты работы используются в нормативных документах по проектированию и эксплуатации металлических конструкций с полимерными покрытиями.

Корягин С.І. Наукові основи забезпечення несучої здатності металевих конструкцій, які зміцнені армованими полімерними покриттями. Дисертація на здобуття вченого ступеню доктора технічних наук з спеціальності 05.02.09. Динаміка, міцність машин, приборів і апаратури, Ін-т проблем міцності НАН України, Київ, 1995.

Захищається 57 наукових робіт, які присвячені результатам досліджень з впливу технологій, умов експлуатації та інших факторів на несучу здатність металевих конструкцій з полімерними покриттями. Розроблена наукова методологія створення металевих конструкцій, які зміцнені полімерними покриттями. Результати роботи використовуються в нормативних документах з проектування та експлуатації металевих конструкцій з полімерними покриттями.

Koryagin S.I. Scientific foundations for creation strength of metallic constructions reinforced with polymer coatings. Dissertazia (Thesis) for a Doctor of Engineering Science Degree in speciality 05.02.09. Dynamics, strength of the machines, of devices and apparates. Institute of problems of strength, National Academy of science of the Ukraine, Kiev 1995.

57 scientific works are being defended. They include investigations on the influence of technology, conditions of exploitatin and other factors upon the strength of metallic constractions with polymer coatings. Scientific methodology of creating the metallic constructions reinforced with polymer coatings has been developed. The results are used in official documents on design and exploitation of metallic constractions with polymer coatings.

Ключевые слова: несущая способность, трещиностойкость, полимерное покрытие, клеевое соединение, адгезия.

32.00

452900

