

*На правах рукописи*

**Иванов Вячеслав Александрович**

**Методы восстановления технологического и вспомогательного  
оборудования износостойкими композиционными материалами.**

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы  
(лёгкая промышленность).

**Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Научный руководитель  
доктор технических наук  
профессор Тулинов А.Б.

МОСКВА – 2014

Работа выполнена на кафедре «Математические и естественнонаучные дисциплины» ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет туризма и сервиса»

- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Сервисный инжиниринг» ФГБОУ ВПО «РГУТиС»  
**Тулинов Андрей Борисович**
- Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор профессор кафедры «Материаловедение» ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»  
**Курганова Юлия Анатольевна**
- кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационно-измерительные системы и технологии приборостроения» ФГБОУ ВПО «МГУЛ»  
**Помазан Владислав Михайлович**
- Ведущая организация: **Закрытое акционерное общество  
Московская Международная  
Корпорация «Мосинтраст»**

Защита состоится «    » \_\_\_\_\_ 2015 г. в часов на заседании диссертационного совета Д 212.144.03 в Московском государственном университете дизайна и технологии по адресу:  
117997, г. Москва, ул. Садовническая, 33

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета дизайна и технологии

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета

Андреев Е. В.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Технологическое и вспомогательное оборудование в различных отраслях промышленности и сфере коммунального хозяйства в процессе эксплуатации постоянно подвергается различным видам износа. Особенно интенсивному износу подвержены системы водо- и теплоснабжения предприятий. Они как правило находятся в сфере деятельности Главного технолога либо Главного механика. Основными видами дефектов в водораспределительных системах являются абразивное, коррозионное и кавитационное изнашивание оборудования и устройств типа перекачивающих насосов, заслонок, задвижек, фитингов различных конструкций и размеров.

В настоящее время степень износа подобного оборудования носит глобальный характер. Так по официальным данным износ оборудования систем водо- и теплоснабжения в скором времени может достигнуть 70%.

Традиционными методами устранения таких дефектов являются сварка, наплавка и напыление. Указанные методы восстановления дорогостоящи, требуют значительных энергозатрат и не всегда эффективны.

Необходимость в ремонтных технологиях технологического и вспомогательного оборудования, не требующих существенных финансовых затрат, трудовых и материальных ресурсов, существует постоянно. Именно таким требованиям отвечают технологии ремонта с использованием износостойких композиционных материалов. Рациональное использование их физико-химических свойств позволит существенно снизить себестоимость и трудоемкость ремонта и сократить расход энергоресурсов и материалов на их проведение не только в лёгкой промышленности и системах жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), но и при восстановлении оборудования в промышленном производстве.

В последние годы на рынке появляются новые материалы различного назначения, но зачастую для восстанавливаемого оборудования требуются высококачественные материалы с высокими физико-механическими характеристиками. Поэтому разработка новых прогрессивных композиционных материалов и технологических методов их использования, является особенно актуальной.

Появление на рынке подобных высококачественных и доступных по цене ремонтных композиционных материалов позволит значительно повысить возможности и эффективность их применения при проведении ремонтных работ по новым энергосберегающим технологиям вспомогательного оборудования лёгкой промышленности, различного производственного и теплофикационного оборудования, сетей ЖКХ, повысить оперативность и качество этих работ.

Композиционные материалы на полимерной основе обладают высокими физико-механическими и химическими свойствами, использование которых приводит к значительному снижению трудоемкости ремонта вспомогательного оборудования легкой промышленности, различных

трубопроводов, теплонагревательного оборудования, бытовых устройств, водяных и газовых магистралей и т.п., что основывается на следующих особенностях их применения:

- ремонтная технология на основе подобных материалов не требует сложного оборудования и высокого уровня подготовки рабочих;
- при ремонте с использованием композитов отсутствует необходимость в разборке узлов и агрегатов;
- применение композиционных материалов чаще всего позволяет не только исключить сварку, наплавку или пайку, но и выполнять ремонтные работы таких изделий и узлов, которых невозможно восстановить с помощью других известных методов, а так же в опасных условиях;
- использование полимерных композитов дает возможность проводить восстановление деталей, исключая сложные технологические процессы нанесения материалов и последующей обработки.

Применение композиционных материалов с металлическими наполнителями знаменует совершенно новый подход к технологии ремонтных и сборочных работ. Без использования энергии, механических способов соединений решается одна из главных задач в ремонтном и сборочном производстве. Данная ремонтная технология носит название «холодная сварка» и обладает следующими основными достоинствами:

- проведение ремонта возможно проводить в производственных и полевых условиях без подведения энергии;
- ремонтно-восстановительные работы возможно выполнять в труднодоступных и неудобных местах;
- отсутствует необходимость в применении специальной оснастки и инструмента при восстановлении фрагментов деталей;
- металлополимеры ускоренного отверждения позволяют произвести срочный (аварийный) ремонт в течение короткого времени (3-4 мин);
- высокая технологичность и простота приготовления смеси не требует дополнительного обучения пользователя;
- возможность осуществлять соединения разнородных материалов между собой и в различных сочетаниях между ними;
- использование металлополимеров в качестве конструкционных материалов.

Экономический эффект от применения металлополимеров может быть довольно значительным. Он достигается за счет, прежде всего, экономией энергетических и материальных ресурсов:

- за счет неиспользования сварочного оборудования;
- за счет ликвидации брака из-за литейных дефектов, обнаруженных как непосредственно после литья, так и после механической обработки корпусных деталей.

Все эти преимущества подтверждают целесообразность широкого использования ремонтных композиционных материалов службами

Главного технолога и Главного механика на предприятиях легкой промышленности и в городском коммунальном хозяйстве.

**Цель и задачи исследования.** Целью настоящего диссертационного исследования является разработка методов восстановления вспомогательного оборудования лёгкой промышленности, а так же оборудования систем водо-, теплоснабжения на базе применения износостойких композиционных материалов. Для осуществления поставленной цели решались следующие задачи:

1. Провести систематизацию и анализ износа, дефектов технологического и вспомогательного оборудования в промышленности и в ЖКХ.
2. Исследовать различные виды износа в системах водо- и теплоснабжения и причины их возникновения.
3. Провести анализ ремонтных композиционных материалов, дать предложения по их применению при проведении ремонтно-восстановительных работ технологического и вспомогательного оборудования легкой промышленности и в ЖКХ.
4. Провести исследование существующих на рынке композиционных материалов и выделить из всей номенклатуры наиболее подходящие для ремонтно-восстановительных работ.
5. Исследовать основные физико-механические характеристики композиционных материалов «Chester Molecular».
6. Разработать методологию восстановления оборудования с использованием ИРКМ и определить экономическую эффект предлагаемых технологических методов.

**Научная новизна.** Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке новых технологических методов проведения ремонтно-восстановительных работ и продления жизненного цикла технологического и вспомогательного оборудования легкой промышленности и оборудования систем ЖКХ на базе применения износостойких ремонтных композиционных материалов (РКМ). На основе проведения комплекса теоретических, экспериментальных и технологических исследований:

- разработан метод восстановления технологического и вспомогательного оборудования легкой промышленности и оборудования инженерных сетей ЖКХ и его защиты от различных видов износа на основе использования износостойких РКМ;
- проведен анализ номенклатуры композиционных материалов и экспериментально определены наиболее подходящие композиции с характеристиками, удовлетворяющими условиям работы оборудования;
- экспериментальным путем определены износостойкость и адгезионные характеристики данных материалов, а так же определены зависимости

- свойств композитов от режимов работы вспомогательного оборудования легкой промышленности оборудования систем ЖКХ;
- дано теоретическое обоснование технологии устранения дефектов оборудования легкой промышленности с учетом условий его работы, что в результате приводит к значительному уменьшению материальных и трудовых затрат.

### **Практическая значимость и реализация результатов работы.**

Методы использования износостойких композиционных материалов службами главного механика на предприятиях промышленности, в том числе легкой и в сфере ЖКХ способствуют дальнейшему распространению предлагаемой технологии.

Разработаны и внедрены новые технологические методы восстановления и защиты от коррозионного, кавитационного и абразивного износа деталей и узлов оборудования с использованием композиционных материалов.

Ремонтно-восстановительная технология с использованием износостойких композитов не требует энергетических и значительных материальных затрат, а так же имеет широкую область применения, что приводит к обеспечению высокого экономического эффекта.

На ряде предприятий осуществлено практическое внедрение разработанных технологий.

**Личное участие автора** заключается в постановке и решении задач по разработке методов восстановления технологического и вспомогательного оборудования легкой промышленности и оборудования систем водо-, теплоснабжения износостойкими композиционными материалами; в исследовании адгезионных и износостойких характеристик композиционных материалов; в создании методов выбора износостойких композитов и прогнозировании долговечности их работы; в разработке технологии нанесения защитных покрытий из износостойких композиционных материалов.

### **Основные положения диссертации, которые выносятся на защиту:**

- результаты исследований адгезионной прочности соединений, выполненных с использованием износостойких композиционных материалов;
- результаты исследований композиционных материалов с керамическими наполнителями на износостойкость;
- методы восстановления оборудования систем водо-, теплоснабжения износостойкими композиционными материалами;
- результаты внедрения методов восстановления промышленного оборудования и систем ЖКХ износостойкими композиционными материалами.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается согласованием теоретических и экспериментальных исследований, использованием современных методов исследований, новейших лабораторных установок для исследования физико-механических и износостойких свойств композиционных материалов, необходимым объемом экспериментальных исследований, выполненных автором, базируется на использовании методов математической статистики и внедрением предложенных методов восстановления.

**Апробация работы.** Основные положения, результаты исследований и их практическое применение неоднократно докладывались на научно-технических конференциях и выставках, таких как 8-я межвузовская студенческая научно-практическая конференция «Молодежь, наука, сервис - XXI век» - 2009, научно-практическая конференция «Актуальные проблемы материаловедения» - 2009, конкурс «УМНИК» - 2009, выставка «Пятый фестиваль науки» - 2010, интернет-конференция «Новые материалы, наносистемы и нанотехнологии» - 2010, Форум Селигер-2010 «Инновации и техническое творчество», Всеукраинская научно-практическая конференция «Современные технологии в легкой промышленности и сервисе» - 2011, XVII Международная научно-практическая конференция «Наука-Сервису» - 2012, конкурс-фестиваль студенческого творчества «Студенческая весна Подмосковья-2012», пленарное заседание на Всероссийской научной конференции аспирантов и молодых учёных «Современные проблемы туризма и сервиса» - 2013, международный научный симпозиум «Неделя горняка – 2012, 2013, 2014».

**Публикации.** Основное содержание диссертации отражено в 14 публикациях в журналах, сборниках научных статей, в том числе 3 из них в журналах, рекомендованных ВАК.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, библиографического списка и приложений. Диссертация изложена на 195 страницах, содержит 111 рисунков, 25 таблиц. Список литературы включает 111 наименований. Приложения представлены на 29 страницах.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность работы, дана общая характеристика диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, обозначены объекты исследования, отражена научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** проведен анализ технологического и вспомогательного оборудования легкой промышленности и оборудования ЖКХ, относящегося к комплексам тепло-, водоснабжения, дефектов этого

оборудования и композиционных материалов, использующихся при проведении ремонтно-восстановительных работ.

В связи с высокой степенью износа данного оборудования, а особенно кризисным состоянием жилищно-коммунального комплекса, деятельность предприятий в этой сфере характеризуется высокими затратами, отсутствием экономических стимулов снижения издержек на производство услуг, неразвитостью конкуренции. Все это приводит к высокой степени износа основных фондов, неэффективной работе предприятий, большим потерям энергии, водных и других ресурсов.

Степень износа объектов коммунального хозяйства по отдельным муниципальным образованиям достигает 70-80%, при этом темпы нарастания износа продолжают составлять 1,5-3% в год.

Предварительный анализ показывает, что разработка и применение современных технологий и материалов, конструкций и оборудования обеспечивает прогнозируемое увеличение энергоэффективности в 2-3 раза, а снижение затрат на обслуживание до 30%.

В соответствии с представленной в диссертации классификацией выделены двенадцать основных элементов, обеспечивающих функционирование систем водо- и теплоснабжения в различных отраслях промышленности и сфере коммунального хозяйства, к которым относятся перекачивающие насосы, задвижки, вантузы, затворы, фланцы, трубопроводная арматура, теплообменники, вентили, отводы трубопроводов, заглушки, клапана, фитинги.

Аналитически установлено, что среди рассматриваемых объектов наибольшему износу подвержены насосы и задвижки, которые в процессе эксплуатации испытывают максимальные гидравлические нагрузки.

Оборудование водо- и теплоснабжения, а в особенности перечисленные выше устройства с течением времени подвергаются различным видам износа под действием динамического напора водной среды и теплоносителей, ударного действия находящихся в них абразивных частиц (песка и др.), коррозионных и кавитационных процессов (рис.1). Это приводит к появлению различного вида дефектов в виде раковин, трещин, утонения стенок устройств и нередко их разрушениям и, как следствие, к разгерметизации и утечкам жидкостей из систем жизнеобеспечения. В результате утонения стенок, возникающих в результате износа, изменяются проходные сечения, что приводит к потерям давления в системах водо- и теплоснабжения.



Рис. 1. Дефекты оборудования



Проведенный анализ показал, что в настоящее время основными мероприятиями по восстановлению изношенного оборудования и устройств является либо его замена, что экономически нецелесообразно ввиду значительных материальных и других затрат, либо проведение ремонтных работ с использованием энергоёмких технологических процессов каковыми являются сварка, наплавка, напыление.

Технологии ремонта с использованием износостойких ремонтных композиционных материалов (ИРКМ), исключают потребность в дорогостоящей оснастке и оборудовании, и зачастую являются адекватной заменой наплавке, напылению, сварке и пайке. Рациональное использование их физических и химических свойств позволит значительно снизить себестоимость и трудоемкость работ на 50-60% и снизить на 50% расход материалов на проведение ремонта.

Проведенный анализ показал потребность в создании и разработке методов использования износостойких композитов необходимых для восстановления оборудования инженерных сетей и продления его жизненного цикла. Именно такая задача решается в данном диссертационном исследовании.

Композиционные материалы, обладающие износостойкими свойствами могут использоваться при проведении ремонтных и профилактических мероприятий в таких отраслях, как лёгкая промышленность, ЖКХ, энергетика, машиностроение, химическая и нефтеперерабатывающая промышленность, авто и судоремонт, и в других.

Анализ имеющихся на рынке ИРКМ выявил, что наиболее предпочтительной фирмой, поставляющей в Россию гамму ремонтных композитов, является польская компания «Chester Molecular». Материалы этого производителя отличаются стабильным высоким качеством, а так же по своим эксплуатационным и физико-механическим показателям не уступают материалам, поставляемым в нашу страну такими известными фирмами как «Durmetal» (Швейцария), «Belzona» (США), «Diamant» (ФРГ), «Loctite» (США) и др., но существенно дешевле этих аналогов, т.е. по важнейшему соотношению «цена/качество» - оказываются наиболее приемлемыми.

Анализ характеристик ремонтных композиционных материалов различных производителей показал, что для устранения износа металлических поверхностей в оборудовании и агрегатах систем водо- и теплоснабжения наиболее предпочтительными являются композиты с керамическими наполнителями. Такими материалами являются композиционные материалы фирмы «Chester Molecular» (Польша), а именно: «Metal Ceramic T» - пастообразной консистенции; «Metal Ceramic F, FHT, FSL» - эти три вида материалов имеют жидкую консистенцию. Основные физико-механические характеристики этих материалов представлены в таблице 1.

Таблица 1.

**Физико-механические характеристики материалов Metal Ceramic**

Группы материалов	Metal Ceramic			
Наименования материалов	Ceramic T	Ceramic F	Ceramic FHT	Ceramic FSL
Консистенция	Паста	Жидкость		
Удельная масса композиции, (г/см <sup>3</sup> ) при 25 °С	2,03	1,90	2,00	2,00
Цвет	Серый	Серый, синий	Серый	Серый, синий
Пропорции смешивания (основа; активатор) по массе по объёму	2,5:1 2:1	9:1 упаковка	9:1 упаковка	9:1 упаковка
Жизнеспособность композиции при 20 °С, мин	20	15	20	50
Время отверждения до механической обработки, час	3,5	3,5	4	7
Максимальная температуростойкость, °С	200	200	220	200
Рабочая температура, °С	-50 +150	-50 +150	-50 +180	-50 +150
Предел прочности, МПа при сжатии (согласно ISO 604) при изгибе (согласно ISO 178) на сдвиг (согласно ISO 4587)	144 90 22,8	120 110 22,9	120 105 15,4	120 110 24
Срок хранения, месяц	36			
Фасовка, кг	1; 2; 5.	0,5; 1; 3.	0,5; 1.	0,5; 1; 3.

Материалы «Chester-Ceramic» успешно применяются для восстановления корабельных гребных винтов, лопастей роторов, для восстановления поверхностей подвергшихся коррозии. Поэтому они могут быть использованы для восстановления оборудования систем водо- и теплоснабжения, к каковым относятся корпуса насосов, теплообменники, заслонки, задвижки и другие агрегаты.

В итоге, на основании изучения состояния вопроса, был проведен анализ и систематизация дефектов оборудования систем водо-, теплоснабжения, исследованы различные виды его износа, рассмотрены износостойкие композиционные материалы представленные на рынке, а так же выбраны наиболее подходящие из них для проведения восстановительных работ технологического и вспомогательного оборудования.

**Во втором разделе** рассмотрены теоретические методы определения адгезии и износостойкости ремонтных композиционных материалов.

Использование ИРКМ при восстановлении технологического и вспомогательного оборудования в различных отраслях промышленности и сфере коммунального хозяйства, требует тщательного изучения процесса адгезии, образующегося при соединении полимерной композиции с металлическими и неметаллическими поверхностями. Одним из главных

факторов, определяющих работоспособность металлополимерных материалов и различных конструкций является прочность и устойчивость адгезионных связей полимер-металл.

Исследование адгезионной прочности соединений полимер-металл может проводиться двумя методами — разрушающим и неразрушающим. К неразрушающим относятся калориметрический, спектрометрический и термодинамический методы. Однако наиболее широко для определения адгезии соединений полимер-металл применяются разрушающие методы, такие как метод сдвига, нормального и неравномерного отрыва, метод штифтов. Именно эти методы подробно рассмотрены в диссертации.

При проведении исследований было установлено, что на прочность адгезионных соединений оказывают влияние ряд факторов, особенно технологического и эксплуатационного характеров, что крайне важно при использовании полимерных материалов для восстановления различных видов оборудования в промышленности и сфере ЖКХ.

Исследование факторов, обеспечивающих надёжность адгезионных соединений позволило классифицировать их по предложенной на рис.4. структурной схеме. Каждый из приведенных в схеме параметров оказывает определённое воздействие на прочностные характеристики соединения и позволяет регулировать как технологические, так и эксплуатационные свойства соединяемых материалов.

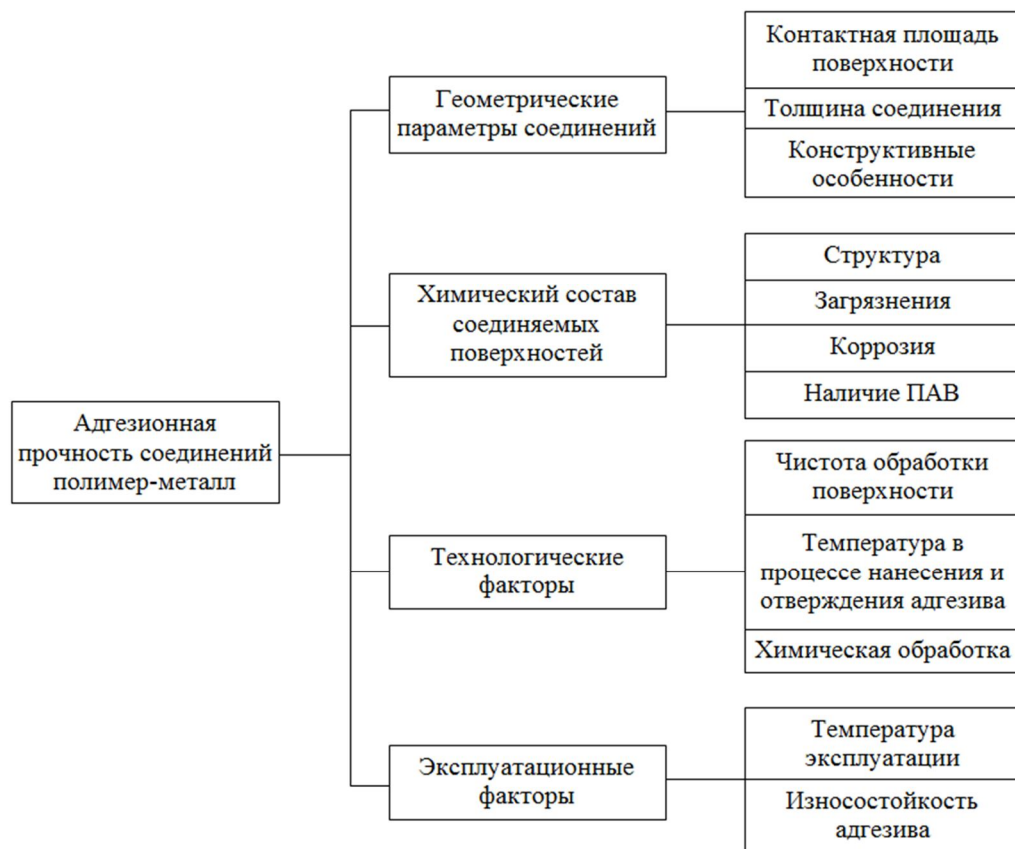


Рис. 2. Схема параметров, влияющих на адгезионную прочность.

Изучение влияния этих факторов позволило рекомендовать следующее справедливое для большинства металлополимеров соотношение

влажности и температуры окружающей среды, определяющее значение температуры, при которой следует выполнять ремонт с обеспечением долговечности и надёжности металлополимерного соединения:

$$t \geq 0,625 \cdot \delta - 19, \quad (1)$$

где  $\delta$  – относительная влажность воздуха в %.

В диссертации изучен процесс влияния температуры на прочность соединений материалов «Chester-Ceramic». Результаты этого исследования выражены в виде графической зависимости (рис.3).

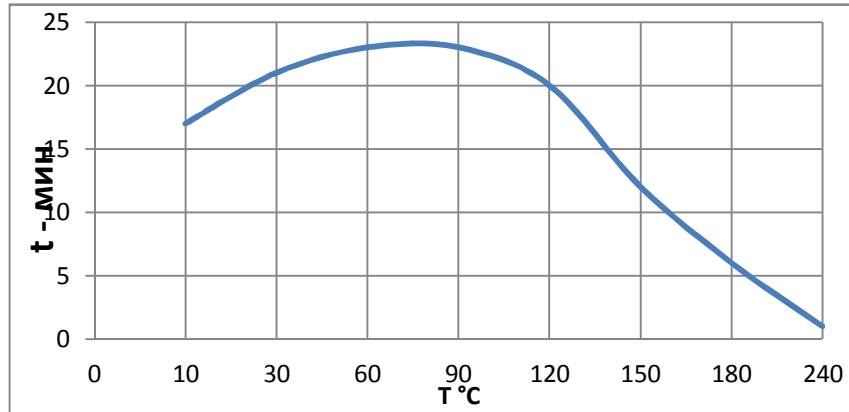


Рис. 3 Зависимость адгезионной прочности композитов «Chester-Ceramic» от температуры

Систематизируя экспериментальные исследования установлено, что влияние высоты выступов шероховатости поверхности на адгезионную прочность может быть различным. При напылении различных плёнок на поверхность чугуна имеет место максимум адгезии при глубине шероховатости 80-100мкм (рис.4).

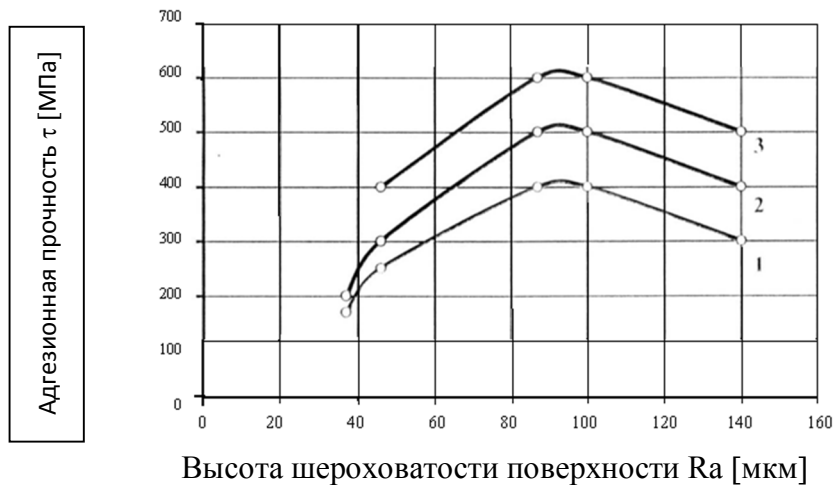


Рис.4. Зависимость адгезионной прочности, определяемой сдвигом, от глубины впадин шероховатой поверхности чугуна при адгезии плёнок: 1-латуни, 2-цинка, 3-алюминия.

Рассмотрев в диссертационной работе различные виды адгезионных теорий, был сделан вывод о необходимости учёта при комплексной оценке адгезионной прочности адгезионных и когезионных составляющих:

$$\tau_{\Sigma} = \tau_a + \tau_k, \quad (2)$$

где  $\tau_a$  – адгезионная составляющая

$$\tau_a = \tau_0 \cdot R_{\Delta} \cdot k_3 \cdot k_{ж} \cdot (1 - k_{ш}), \quad (3)$$

где  $\tau_k$  – когезионная составляющая

$$\tau_k = \sigma_{изг} \cdot k_{ш} \cdot k_3 \cdot k_n \quad (4)$$

Поскольку исследование поперечного среза границы композит-металл выявило полноценное заполнение впадин шероховатости поверхности при нормальной температуре нанесения слоя компаунда, значение коэффициента заполняемости  $k_3 = 1$ . А так же учитывая то, что состав ИРКМ подобран с целью исключения остаточных напряжений, за счет создания равномерной структуры поверхностного слоя наполнителем, нет необходимости в учёте влияния концентраторов напряжений, то есть  $k_n = 1$ . Следовательно,

$$\tau_\Sigma = \tau_0 \cdot R_\Delta \cdot k_3 \cdot k_{ж} \cdot (1 - k_{ш}) + \sigma_{изг} \cdot k_{ш} \quad (5)$$

Это математическое выражение целесообразно использовать для получения наиболее точных результатов при расчетах адгезионной прочности композитов, ибо оно учитывает как адгезионные, так и когезионные свойства материалов.

В процессе эксплуатации систем водо- и теплоснабжения износу подвергаются внутренние полости центробежных насосов, крыльчатки, заслонки, соединения трубопроводов и некоторые другие элементы. Это происходит в результате разрушающего действия абразива, коррозии и кавитации. Эти виды износа подробно рассмотрены в диссертации. Их перечень представлен на рис. 5.

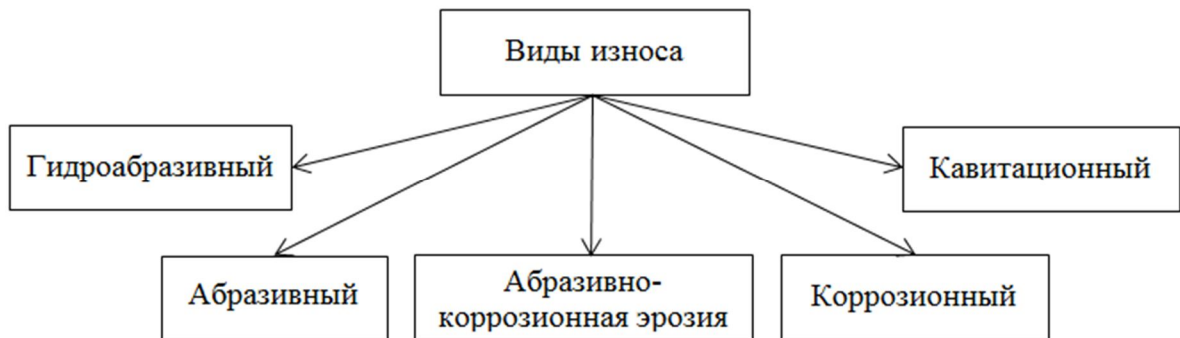


Рис. 5. Перечень рассмотренных в диссертации видов износа

Во всех методах износа потерю массы и линейный износ определяют соответственно прямым изнашиванием и измерениями размеров образца до и после испытаний.

При обработке результатов вычисляют средние арифметические значения потерь массы  $g_э$ , г, или средний линейный износ  $h_э$ , мм, эталонных образцов и потерь массы  $g_и$  или средний линейный износ  $h_и$  испытуемых образцов.

**Относительная износостойкость** ( $K_g$  или  $K_h$ ) исследуемого материала вычисляется по формулам:

$$K_g = g_э \rho_и N_и / (g_и \rho_э N_э) \quad (6)$$

$$K_h = h_э N_и / (h_и N_э) \quad (7)$$

где  $\rho_э$ ,  $\rho_и$  – плотности эталонного и исследуемого материалов, г/см<sup>3</sup>;  
 $N_э$ ,  $N_и$  – число ударов (ГОСТ 23.212-82).

Прочность соединения  $\sigma_B$  в значительной степени определяется возникающим в слое адгезива напряжением  $\sigma_{BH}$ , а так же зависимостью от толщины слоя и параметров контактного взаимодействия на границе адгезив-субстрат:

$$\sigma_B = k \cdot \sigma_{BH} \cdot h \quad (8)$$

где:  $h$  – толщина пленки,  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, проведенное теоретическое исследование адгезии полимерных композитов к металлическим поверхностям, выявило зависимость прочности соединения от адгезии композиционного материала к металлическим поверхностям. Так же было установлено, что для улучшения прочности соединения, ремонтируемая поверхность должна иметь определенный уровень шероховатости. Исследование различных видов износа в системах водо- и теплоснабжения, степени их влияния и причин их возникновения дало представление о возможностях применения определенных видов компаундов. Для подтверждения этих выводов был выполнен комплекс лабораторных исследований.

**В третьем разделе** отражены экспериментальные исследования прочностных характеристик износостойких композитов.

Для оценки адгезионной прочности соединений с использованием износостойких ремонтных композиционных материалов (ИРКМ), их так же можно классифицировать как клеевые, при кратковременном нагружении чаще всего применяются значения максимального напряжения и средней прочности.

В практике контрольных испытаний качества соединения наиболее часто применяется показатель средней прочности, характеризуемый напряжением, определяемое как отношение разрушающего усилия к полной площади склеивания. Оценка максимальных напряжений в клеевых соединениях производится расчетным методом.

Так, при расчете клеевых цилиндрических соединений на сдвиг может быть использовано соотношение:

$$\tau_{сдв} \leq \tau_{max} / \sqrt{(K_{\sigma}/2)^2 + K_{\tau}^2}, \quad (9)$$

где  $\tau_{max}$  и  $\tau_{сдв}$  - максимальное и среднее касательное напряжение;  $K_{\sigma}$  и  $K_{\tau}$  - коэффициенты концентрации нормальных и касательных напряжений, определяемые расчетным путем.

В инженерных расчетах значение  $\tau_{max}$  в формуле (9) принимается равным значению допускаемого напряжения при сдвиге или срезе.

Целью проведения испытаний было определение прочностных характеристик ИРКМ, а также оценка эффективности различных технологических факторов, используемых при выполнении соединений (предварительная подготовка ремонтируемых поверхностей, режимы отверждения, технология нанесения компаунда и т.д.).

Наиболее распространенными схемами для адгезионных испытаний клеевых соединений являются сдвиг и равномерный отрыв.

Для определения прочностных характеристик ИРКМ в экспериментах были использованы композиционные материалы фирмы «Chester Molecular» Chester Metal Ceramic F, Chester Metal Ceramic FSL, Chester Metal Ceramic FHT, Chester Metal Ceramic T, которые прекрасно подходят для выполнения ремонтно-восстановительных работ, а так же для нанесения износостойких покрытий. Для обезжиривания поверхности использовался очиститель F-7.

При проведении экспериментов на сдвиг с целью обеспечения достоверности получаемых результатов в каждом из режимов испытаний использовалось по пять образцов каждого вида.

Все образцы (и на сдвиг и на отрыв) перед нанесением композиционного материала подготавливались по стандартной методике: зачистка поверхности механизированным способом до шероховатости  $R_z = 175$  мкм; обезжиривание зачищенных поверхностей очистителем Chester Molecular F7;

Для полимеризации композиционного материала собранные образцы выдерживались на воздухе при комнатной температуре в течение 24 час.

При испытаниях на сдвиг использована часто применяемая схема сдвига при растяжении внахлестку. Образцы – пластины из стали 40X.

В соединениях такого типа концентрация напряжений образуется, как от отрыва, так и от сдвига. Показатель прочности существенно снижается за счет влияния отрыва, в связи с этим был применен метод центрирования усилия за счёт увеличения в зоне захватов толщины образцов. Это дало возможность существенно снизить значение эксцентриситета – расстояния между продольной осью соединения и осью приложенного усилия.

После испытаний образца вычислялось разрушающее напряжение при сдвиге по формуле:

$$\tau_{\text{сдв}} = P/F, \text{ МПа} \quad (10)$$

где P - разрушающая нагрузка, Н; F - площадь нахлестки, мм<sup>2</sup>  
Затем определялось среднее разрушающее напряжение по формуле:

$$\tau_{\text{ср}} = (1/n) \sum \tau_i, \text{ МПа} \quad (11)$$

где n - количество испытанных образцов;  $\tau_i$  - разрушающее напряжение, МПа.

Обе части испытанного образца изучались визуально и, в процентном отношении от номинальной площади склеивания, оценивался характер разрушения - адгезионный (по плоскости склеивания) или когезионный (по компаунду). Точность оценки составляла 5 – 10%. На образцах типа «грибок», выполненных из стали 40X, проводились испытания на равномерный отрыв, предусматривающий симметричное приложение усилий и отсутствие изгибающего момента.

Модернизированная разрывная машина мод. Р-5 оснащена микроконтроллерной системой управления и сбора данных, а также электронными датчиками нагрузки и перемещения. Испытания проводятся в полуавтоматическом режиме, осуществляется автоматическое ведение протокола испытаний, запись и сохранение в компьютерной базе данных

результатов испытаний, создание отчетов по группе испытаний. Скорость перемещения активного захвата плавно регулируется в диапазоне от 1 до 100 мм. мин. Относительная погрешность силоизмерителя в диапазоне от 0 до 2 кН составляет  $\pm 20$  Н. Разрывная машина оснащена крепёжными губками для установки образцов и оснастки. Общий вид машины Р-5 представлен на рис. 6.

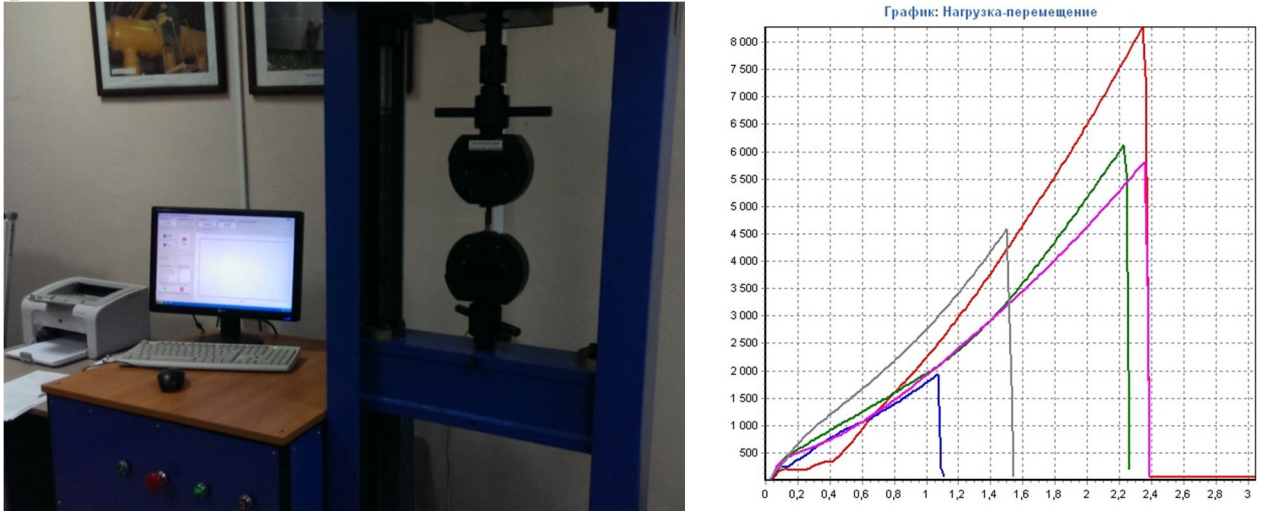


Рис. 6. Общий вид модернизированной разрывной машины Р-5 и график результатов экспериментов

Характер разрушения образцов на отрыв оценивался визуально (рис. 7).



а)

б)

Рис. 7. Образцы после испытаний на отрыв (а) и сдвиг (б)

Общие результаты испытаний на сдвиг материалов Честер Металл Керамик F, T, FHT, FSL представлены на рис. 8.

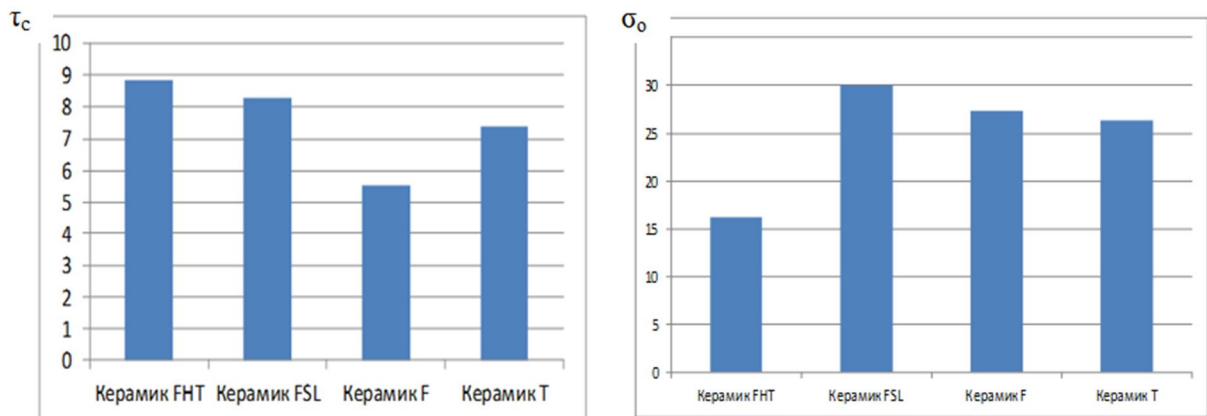


Рис. 8. Диаграмма результатов испытаний на сдвиг и отрыв



К эксплуатационной характеристике композитов следует отнести износостойкость. С целью ее определения с исследуемыми материалами был проведен комплекс экспериментов.

Образцы для этих испытаний изготавливаются из уголков из алюминия с гранью размером 35x15мм (рис.9 (б)). В центре одной из сторон уголка вырезался паз для крепления в держателе на машине трения 77 МТ-1 (рис.9 (а)).



а)



б)

Рис. 9. Машина трения 77 МТ-1 (а) и образец с нанесённым материалом для испытаний

Для исследования материалов при трении с возвратно-поступательным движением подвижного образца (испытания на износостойкость) использовалась машина трения 77 МТ-1, представленная на рис. 9 (а). Предельные для материала или покрытия нагрузки возможно определить на машине с возвратнопоступательным движением 77 МТ-1. Машина трения 77МТ-1 состоит из трех агрегатов: электродвигателя, редуктора и собственно машины трения. Общий вид пары трения продемонстрирован на рис. 10.



Рис. 10. Пара трения

Один из результатов экспериментов отражен на графике (рис.11).



Рис. 11. Потеря массы образца вследствие его изнашивания с течением времени

В ходе подготовки к проведению лабораторных исследований была разработана методика проведения испытаний образцов износостойких композиционных материалов на сдвиг, нормальный отрыв и износостойкость. Дано описание используемого в экспериментах лабораторного оборудования по определению адгезионных характеристик и износостойкости ИРКМ. Экспериментальным путем полученные высокие физико-механические и эксплуатационные показатели применяемых ремонтных составов, подтверждают широкую область применения и рациональность данной технологии при проведении ремонтно-восстановительных работ в различных отраслях промышленности, в том числе лёгкой и в системах ЖКХ.

**В четвертом разделе** отражены технологические методы восстановления оборудования с использованием ремонтных композитов и приведены примеры выполнения подобных работ.

Перед современными технологиями восстановления оборудования и машин стоит задача по обеспечению работоспособности действующей техники, без обращения к специализированным ремонтным предприятиям. Возможность применения холодной сварки (ХС), в качестве основной ремонтно-восстановительной технологии, обуславливается следующими ее достоинствами.

ХС осуществляется на воздухе без использования давления и нагрева, вне защитной среды без применения специализированного оборудования, а так же не нуждается в высоком уровне подготовки исполнителя. В роли основного рабочего инструмента ХС выступает шпатель, который необходим для создания определённой конфигурации шва. Это позволяет с минимальными затратами производить ремонт различного производственного оборудования, в том числе и тяжелой техники в производственных условиях промышленного предприятия, в непригодных для ремонта, а так же пожаро- и взрывоопасных помещениях, и при необходимости в полевых условиях.

Значительное число ремонтных композитов обладают высокой

адгезией практически ко всему многообразию как металлических, так и неметаллических машиностроительных материалов различного назначения, в том числе функционального и конструкционного. Присутствие в составе композиции наполнителя придает ей новые свойства, выявляющие технологические преимущества холодной сварки как перед термическими (традиционными наплавкой, пайкой, сваркой и др.), так и клеевыми способами образования соединений деталей в восстановительных работах.

Формирование свойств композиционной прослойки путём её отверждения происходит по определённому принципу. На рис. 14 показан характер изменения прочности при соединении стальных деталей с использованием композиционного материала «Chester Ceramic – Т».

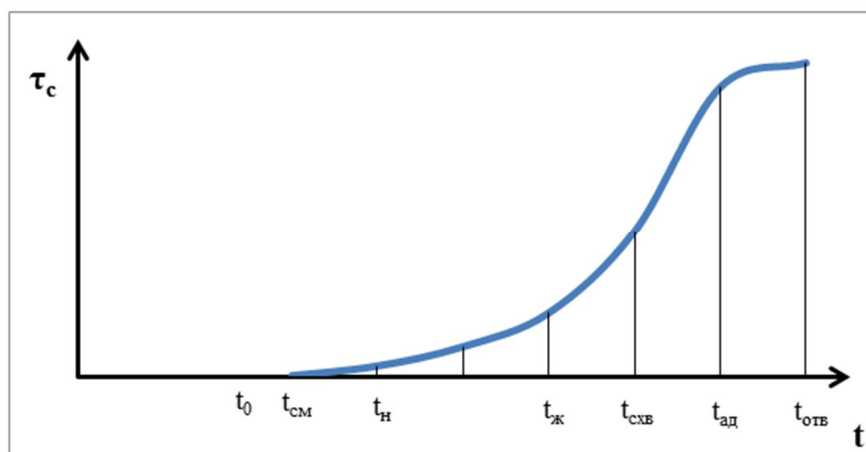


Рис. 12. Изменение прочности, в зависимости от времени полимеризации композита:  $t_0$  – первоначальный момент смешивания компонентов;  $t_{см}$  – время окончательного перемешивания;  $t_n$  – момент нанесения композита на поверхность детали;  $t_ж$  – время жизнеспособности смеси;  $t_{схв}$  – момент схватывания;  $t_{ад}$  – время частичного отверждения;  $t_{отв}$  – время полного отверждения.

Ремонтно-восстановительные работы с применением полимерных материалов в различных отраслях промышленности можно условно разделить на три основных направления:

- использование полимерных материалов для устранения брака и дефектов основной продукции предприятия, например, литьевого брака;
- ремонт основного и вспомогательного технологического оборудования самих предприятий (насосного, вентиляционного оборудования, обрабатывающих станков, трубопроводов, технологических емкостей);
- ремонт систем жизнеобеспечения в городском коммунальном хозяйстве (в том числе нанесение износостойких покрытий на основе композиционных материалов с керамическими наполнителями).

Технологический процесс применения ремонтных композитов при восстановлении деталей, узлов и оборудования в целом отличается от энергоёмких техпроцессов (сварка, пайка, наплавка, напыление), которые он с успехом может заменить в целом ряде конкретных случаев.

В таблице 2 представлен технологический маршрут с перечнем обязательных операций, каждая из которых отличается своей спецификой и требованием обязательного выполнения определённых условий,

необходимых для качественного выполнения технологического процесса.

Таблица 2

Технологический маршрут восстановления деталей металлополимерными материалами

№ п/п	Наименование операций	Технологические переходы
1	Подготовка детали (узла)	Исправление формы; Очистка поверхности; Обезжиривание.
2	Приготовление композиции	Вручную; Механизированным способом; С помощью туб.
3	Нанесение композиции	Вручную (кистью, шпателем); Механизированным способом.
4	Формирование слоя композиции	Под давлением; Без давления; Неподвижными оправками; Подвижными оправками.
5	Отверждение композиции	Холодное; Горячее; Смешанное.
6	Обработка детали	Снятие заусенцев и наплывов; Механообработка.

Проведенный анализ возможностей применения ИРКМ в различных отраслях промышленности, в том числе лёгкой, а так же в сфере коммунального хозяйства выявил широкую область их использования.

Большой интерес представляют работы, связанные с устранением результатов различных видов износа. В этом случае, как показали результаты экспериментов, наиболее целесообразно использовать композиционный материал «Chester-Ceramic», что и было осуществлено на практике. Предложенный в диссертации метод восстановления был использован на ООО «Житомирский картонный комбинат» при проведении ремонтных мероприятий по устранению износа, возникшего в результате воздействия коррозии, посадочных поверхностей прессового вала БДМ, что подтверждено приложенным к диссертации актом внедрения. Подобный дефект привел к биению вала, так как были изношены не только внутренняя поверхность вала, но и наружная поверхность цапфы, устанавливаемой внутрь вала, а также разбиты крепежные отверстия.

На рис. 13 показана восстановленная цапфа с нанесённым ИРКМ «Честер Керамик-Т», а на рис. 14 её монтаж на вал.



Рис. 13. Цапфа с нанесённым ИРКМ



Рис. 14. Монтаж цапфы на вал

Технологический маршрут ремонтной работы представлен в таблице 3.

Таблица 3.

**Технологический маршрут восстановления прессового вала БДМ**

№	Наименование операции	Используемые оснастка, инструмент, материалы
1	Дефектация, внешний осмотр	Рулетка, штангенциркуль
2	Зачистка поверхностей цапфы и вала	Электродрель с насадками, металлические щетки, наждачная бумага
3	Обезжиривание	Очиститель F-5 ф. «Chester Molecular», ветошь
4	Нанесение разделительного состава на внутреннюю поверхность вала	Разделительный состав ф. «Chester Molecular», кисти, фен строительный
5	Замер внутреннего диаметра вала и наружного у цапфы	Штангенциркуль
6	Подготовка ремонтного состава	Пластина из тинакса, шпатели, материал «Честер-Керамик» (2 компонента)
7	Нанесение композиционного материала на поверхности цапфы и вала	Шпатели, композиционный материал (в смеси)
8	Сборка цапфы с валом	Подъемное устройство, гаечные ключи, динамометрический ключ
9	Удаление излишков материала	Шпатели, ветошь
10	Визуальный контроль после сборки	

Опыт использования ремонтных композиционных материалов за последние 10 лет позволил систематизировать эффект их применения и представить в виде таблицы, отражающей экономический эффект и сроки окупаемости затрат от ремонта типовых узлов и деталей технологического и вспомогательного оборудования при сравнении с традиционными способами (таблица 4).

Таблица 4.

**Эффективность применения композиционных материалов в промышленности и сфере ЖКХ**

№	Наименование предприятия	Работы по восстановлению	Экономический эффект (тыс. руб.)	Срок окупаемости (мес.)	Год внедрения
1	Лесопромышленный комплекс (ЛПК) г. Сыктывкар	Трубная доска теплообменника выпарной камеры	834,5	8	2004
2	«Теплосеть» г. Мытищи	Валы центробежных насосов, подшипниковые узлы	283,0	4	2004
3	Целлюлозно-картонный комбинат (ЦКК) г. Братск	Крупногабаритный обрезающий вал	452	5,3	2005
4	Медеплавильный комбинат «Эрдэнэт»	Конусная дробилка	5250	6,5	2008

5	КБФ-филиал «Гознака» г. Краснокамск	Напорный ящик	2803	3,7	2011
6	КБФ-филиал «Гознака» г. Краснокамск	Крупногабаритный гранитный вал	5860,4	1	2011
7	ООО «Житомирский картонный комбинат» г. Житомир	Прессовый вал БДМ	284	10,1	2014
			<b>15766,9</b>		

Как видно из таблицы итоговые цифры говорят о высокой эффективности технологии восстановления оборудования с использованием прогрессивных ремонтных композитов.

### **Заключение.**

В диссертационной работе дано теоретическое обоснование методологии предлагаемой ремонтной технологии и решение проблемы восстановления и защиты от различных видов износа технологического и вспомогательного оборудования, а так же сетей водо- и теплоснабжения с помощью износостойких композиционных материалов.

### **Основные выводы и результаты диссертационной работы.**

1. Проведен аналитический обзор различных видов оборудования и системы водо-, теплоснабжения, а так же комплексный анализ и систематизация дефектов, возникающих в процессе эксплуатации этого оборудования.
2. Установлено, что наибольшее отрицательное влияние на производительность исследуемого оборудования оказывает износ поверхностей, подверженных абразивному, коррозионному, кавитационному видам износа.
3. Исследованы, предлагаемые для ремонта различных видов оборудования композиционные материалы, проведен анализ возможностей их применения при восстановительных работах и установлено, что наиболее оптимальными для устранения различных видов износа являются композиты с керамическими наполнителями.
4. Проведено исследование основных видов износа, оценено влияние каждого вида на износ поверхностей, подвергаемых гидравлическому воздействию газовоздушных и водных сред, и степень разрушения поверхностей из различных материалов в процессе эксплуатации оборудования.
5. Исследовано адгезионное взаимодействие РКМ с металлическими и неметаллическими поверхностями и определены математические зависимости адгезионной прочности от конструктивных и технологических факторов.

6. Разработана методика испытаний и проведен комплекс экспериментальных исследований по определению прочности и износостойкости композиционных материалов с керамическими наполнителями.
7. Разработаны методы восстановления основных деталей и узлов технологического и вспомогательного оборудования в лёгкой промышленности и в системах жизнеобеспечения ЖКХ, а так же разработана техническая документация по использованию предлагаемой технологии и даны предложения по широкому применению в различных отраслях промышленности.
8. Техничко-экономический эффект предложенной технологии обеспечивает снижение стоимости ремонтных работ в 5-6 раз, сокращение сроков проведения ремонта от 2 до 3 раз по сравнению с традиционными методами, продление срока эксплуатации восстановленного оборудования от 2 до 4 раз. Экономический эффект от внедрения предложенной технологии в 2014 г. на одном из предприятий составил 284 000 рублей.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.**

### **I. Публикации в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Иванов В.А., Иванов М.Н. Уникальное предложение. // Журнал «Целлюлоза. Бумага. Картон» №4 2012г.
2. Тулинов А.Б., Иванов В.А. Возможности устранения дефектов теплофикационного оборудования композиционными материалами. // Электронный журнал "Сервис в России и за рубежом" выпуск 1(39), 2013.
3. Тулинов А.Б., Иванов В.А., Островский М.С. Применение металлополимерных композитов для устранения дефектов горного оборудования. // Журнал «Горное оборудование и электромеханика» выпуск №3, 2013.

### **II. Материалы конференций. Иные издания.**

4. Тулинов А.Б., Иванов В.А. Разработка нового температуростойкого композиционного материала и технологии устранения дефектов в системах городского теплоснабжения. // Сборник научных статей на основе материалов конференции «Новые материалы, наносистемы и нанотехнологии», г. Ульяновск, 2010г.
5. Тулинов А.Б., Иванов В.А. Восстановление систем теплоснабжения с использованием композиционных материалов. // Материалы Всеукраинской научно-практической конференции «Современные технологии в легкой промышленности и сервисе», г. Хмельницкий, 2011г.
6. Тулинов А.Б., Иванов В.А., Гончаров А.Б. Прогрессивные технологии и материалы для восстановления горного оборудования. // Сборник научных

- трудов семинара «Современные технологии в горном машиностроении». – М.: МГГУ.- 2012. – 445 с.
7. Тулинов А.Б., Иванов В.А. Восстановление поверхностей агрегатов теплоснабжения композиционными материалами с керамическими наполнителями. // Материалы Всероссийской научной конференции аспирантов и молодых учёных. – М.:ФГБОУ ВПО «РГУТиС», 2013.– 228 с.
  8. Тулинов А.Б., Иванов В.А. Эффективные технологии устранения дефектов теплофикационного оборудования с использованием композиционных материалов. // Материалы Всероссийской научной конференции аспирантов и молодых учёных. – М.:ФГБОУ ВПО «РГУТиС», 2013.– 228 с.
  9. Тулинов А.Б., Островский М.С., Иванов В.А. Восстановление гидроцилиндров производственного оборудования композиционными материалами. // Сборник научных трудов семинара «Современные технологии в горном машиностроении». - М.: МГГУ.- 2013. – 379 с.
  10. Тулинов А.Б., Иванов В.А., Островский М.С. Технология восстановления геометрических размеров гидроцилиндров горного оборудования. // Научно-технический журнал «Горный инженер» (сборник статей «Материалы Международной научно-практической конференции»). – М.: ИПО «У Никитских ворот», 2013. – 312 с.
  11. Тулинов А.Б., Иванов В.А., Гончаров А.Б., Шубенков А.В. Исследование прочности и теплостойкости анаэробных композитов. // Сборник статей «Материалы международного научно-технического семинара «Современные технологии сборки». Москва, МАМИ, 2013г.
  12. Тулинов А.Б., Иванов В.А. Восстановление направляющих скольжения технологического оборудования композиционными материалами. // Сборник научных трудов семинара «Современные технологии в горном машиностроении». – М.: МГГУ.- 2014. – 518 с.
  13. Тулинов А.Б., Иванов В.А. Восстановление износа горного оборудования композиционными материалами. // Сборник научных трудов семинара «Современные технологии в горном машиностроении». – М.: МГГУ.- 2015. – 253 с.

### **III. Патенты и изобретения**

14. Тулинов А.Б., Зак И.Б., Иванов В.А. Способ динамической выверки оси вращающейся печи. Заявка на патент № 2014116347/02 от 23.04.2014.