



## Монография

# ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОСАДОЧНЫХ МЕСТ ПОДШИПНИКОВ АВТОМОБИЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ



ПРИДНЕСТРОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. Т.Г. ШЕВЧЕНКО  
Бендерский политехнический филиал

# ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОСАДОЧНЫХ МЕСТ ПОДШИПНИКОВ АВТОМОБИЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Монография*

Тираспол

*Издательство  
Приднестровского  
Университета*

2024

УДК 621-049.32-036.7

ББК 39.2-08:35.71

Л29

*Рецензенты:*

**В.К. Фёдоров**, д-р техн. наук, проф., ген. директор ОАО «ИРБИС» г. Москва  
**А.В. Димогло**, канд. техн. наук, и.о. зав. каф. технических систем и электрооборудования в агропромышленном комплексе аграрно-технологического факультета ПГУ им. Т.Г. Шевченко.

**Котомчин, А. Н.**

Восстановление посадочных мест подшипников автомобилей с помощью полимерных композиционных материалов : Монография / А. Н. Котомчин, В. А. Зорин, Е. Ю. Ляхов ; Приднестровский государственный университет им. Т. Г. Шевченко, Бендерский политехнический филиал. – Тираспол : Издательство Приднестровского университета, 2024. – 144 р. : fig., tab.

Cerințe de sistem: PDF Reader.

Referințe bibliogr.: p 121-129 (111 tit.).

ISBN 978-9975-3610-7-1 (PDF).

629.3:621.822

К 736

*Рассмотрены технические свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ) и области их практического применения при восстановлении посадочных мест под подшипники узлов транспортных, строительных, коммунальных машин, а также строительных конструкций.*

*Подробно показана методика проведения исследований, а также теоретические предпосылки по совершенствованию применения ПКМ при восстановлении посадочных мест под подшипники. Разработаны соответствующие модели разрушения поверхностей посадочных мест под подшипники, восстановленных полимерными материалами, и разработана математическая модель, описывающая процесс поиска оптимальных режимов получения ПКМ и влияния состава на физико-механические свойства.*

*Издание предназначено для широкого круга специалистов и может быть использовано аспирантами и студентами высших учебных заведений по направлениям подготовки 15.03.01 «Машиностроение»; 15.03.02 «Технологические машины и оборудование»; 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства»; 23.05.02 «Транспортные средства специального назначения».*

**УДК 621-049.32-036.7**

**ББК 39.2-08:35.71**

Рекомендовано Научно-методическим советом ПГУ им. Т.Г. Шевченко

**ISBN 978-9975-3610-7-1 (PDF)**

© Е. Ю. Ляхов, В. А. Зорин, А. Н. Котомчин, 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ВОПРОСА. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ</b>	
1.1. Восстановление деталей как способ поддержания работоспособности автомобилей .....	8
1.2. Анализ отказов корпусных деталей, влияющих на надёжность автомобильной техники.....	10
1.3. Анализ долговечности подшипниковых узлов автотранспортной техники .....	14
1.4. Анализ причин отказов подшипниковых узлов автотранспортной техники .....	16
1.5. Анализ способов восстановления неподвижных соединений подшипников .....	19
1.6. Анализ долговечности полимерных материалов и восстановленных ими изношенных подшипниковых узлов .....	23
<b>ГЛАВА 2. ОБЩАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ</b>	
2.1. Объекты исследования.....	31
2.2. Экспериментальные установки, оснастка, приборы и образцы.....	34
2.3. Методика исследования технологических, физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий .....	41
2.4. Планирование эксперимента и оценка достоверности результатов исследований.....	43
<b>ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ</b>	
3.1. Основные положения .....	45
3.2. Моделирование процессов усталостного разрушения поверхностей подшипниковых узлов автомобилей, восстановленных полимерными материалами .....	46
3.2.1 Модель развития усталостных трещин в стареющих материалах .....	46
3.2.2 Модель развития усталостных макроскопических трещин .....	48
3.2.3 Модель развития усталостных трещин с немалой зоной предразрушения .....	50
3.3. Исследование адгезионной составляющей прочности полимерных материалов при формировании покрытий .....	54
3.3.1 Теоретические предпосылки к исследованию влияния ультразвуковых полей на адгезионную прочность полимерных покрытий .....	54
3.3.2 Порядок проведения исследований .....	61
3.3.3 Результаты исследований .....	64
<b>ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ</b>	
4.1. Влияние технологических режимов на физико-механические свойства покрытий.....	80



4.1.1 Требования, предъявляемые к покрытиям, при восстановлении посадочных мест подшипниковых узлов .....	80
4.1.2 Влияние условий формирования на влаго-, маслопоглощаемость и плотность покрытий .....	82
4.1.3 Влияние условий формирования на ударную прочность и твердость покрытий .....	86
4.2. Исследование работоспособности подшипниковых узлов автомобилей, восстановленных полимерными композиционными материалами 87	
4.2.1 Факторы, влияющие на работоспособность подшипниковых узлов автомобилей, восстановленных полимерными композиционными материалами .....	87
4.2.2 Изменение адгезионной прочности полимерных покрытий в условиях гидростатического воздействия .....	91
4.2.3 Влияние условий нагружения и толщины покрытия на долговечность адгезионных металлополимерных соединений .....	94
4.2.4 Влияние посадки на прочность и долговечность соединений .....	96

## **ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОСАДОЧНЫХ МЕСТ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ КАМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ**

5.1. Общее описание технологического процесса .....	101
5.2. Разработка технологического оборудования и оснастки .....	103
5.3. Разработка технологического процесса .....	108
5.4. Эксплуатационная проверка восстановленных деталей и внедрение технологии в производство .....	111
5.5. Разработка технологического процесса восстановления посадочных мест под подшипники картера коробки передач автомобиля КамАЗ .....	113
5.6. Расчет экономической эффективности внедрения разработанного технологического процесса в производство .....	114

<b>ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ</b> .....	118
Список использованной литературы .....	121
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А</b> .....	130
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б</b> .....	132
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В</b> .....	134

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности использования автотранспортной техники в условиях эксплуатации в Приднестровье является важнейшей экономической проблемой. Для решения этой проблемы необходимо разработать новые конструкционные материалы и технологические процессы ремонта автомобилей в условиях эксплуатации.

Одной из основных задач в автомобилестроении является повышение надежности (долговечности и безотказности) конструктивных элементов.

Значительное влияние на долговечность автомобильной техники оказывает состояние подшипниковых узлов опор качения, режимы, работы которых характеризуются специфическими условиями эксплуатации и ремонта. В соответствии с этим перед ремонтным производством ставится задача улучшения качества восстановления посадочных мест под подшипниковые узлы, обеспечивающие работоспособность и долговечность автомобиля. Способ восстановления должен обеспечить высокую надежность и долговечность отремонтированных конструктивных элементов автомобилей при эксплуатации в тяжёлых транспортных режимах при неравномерных нагрузках и воздействии неблагоприятных климатических условий.

Восстановленные подшипниковые узлы должны обладать возможностью многократного демонтажа и монтажа при техническом обслуживании и ремонте автомобилей. Поэтому задача совершенствования существующих и создание новых конструкционных материалов и технологических методов восстановления посадочных мест под подшипники автомобилей является весьма актуальной.

Решающее значение при этом приобретает использование полимерных материалов и композиций на их основе. Разработка состава полимерного композиционного материала позволяет получить покрытия повреждённых поверхностей деталей автомобиля с заранее заданными свойствами. Разработанный процесс

нанесения полимерного слоя на изношенные поверхности легко поддается механизации и автоматизации, обеспечивает безотходную технологию. Поверхности, покрытые полимерами, не подвергаются коррозии, могут эксплуатироваться в тяжёлых динамических режимах работы в агрессивных средах.

Всестороннее изучение и разработка полимерных композиций, создание новых способов их нанесения и формирования нашли свое отражение в работах С.Б. Айнбиндера, В.А. Белого, В.В. Березткова, ВЛ. Дудчака, В.Н. Кестельмана, В.В. Курчаткина, И.В. Коляско, Ю.Н. Петрова, А.И. Свириденка, А.Д. Яковлева, В.А. Зорина, Р.И. Ли, А.А. Гаджиева и других ученых.

Анализ литературных данных показывает, что для восстановления посадочных мест под подшипники наиболее приемлемыми являются порошкообразные композиции, а направленное изменение свойств полимеров во время их переработки путем оптимизации состава композиции, интенсификации процесса формирования адгезионных соединений является одним из наиболее целесообразных путей создания покрытий с высокими и стабильными физико-механическими свойствами. Однако в практике ремонта автомобилей восстановление указанных деталей порошкообразными композициями, сформированными в условиях силового воздействия, до настоящего времени не применялось.

Целью данного исследования является разработка эффективной технологии восстановления посадочных мест под подшипники автомобилей с применением новых способов восстановления и перспективных полимерных композиционных материалов.

В соответствии с целью поставлены и решены следующие основные задачи:

- определить причины отказов и их влияние на долговечность подшипниковых узлов автотранспортной техники;
- произвести анализ долговечности полимерных материалов и смоделировать процессы усталостного разрушения поверхностей подшипниковых узлов, восстановленных полимерными композиционными материалами;
- произвести оптимизацию состава ремонтной порошковой композиции для восстановления посадочных мест подшипнико-

вых узлов автомобилей в совмещенном электростатическом и ультразвуковом поле (УЗП);

- исследовать адгезионную составляющую прочности новых полимерных композиционных материалов при формировании покрытий изношенных мест подшипниковых узлов автомобильной техники;

- определить влияние технологических режимов на физико-механические свойства покрытий из разработанной ремонтной порошковой композиции;

- исследовать работоспособность подшипниковых узлов автомобилей, восстановленных с применением новой технологии и разработанных полимерных композиционных материалов;

- разработать технологический процесс нанесения нового полимерного материала на изношенные поверхности подшипниковых узлов автомобилей;

- оценить технико-экономическую эффективность восстановления изношенных мест подшипниковых узлов автомобильной техники новой порошковой композицией в совмещенном электростатическом и ультразвуковом поле.

# **ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ВОПРОСА. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

## **1.1. Восстановление деталей как способ поддержания работоспособности автомобилей**

Усложнение конструкции автомобилей, ужесточение требований к их рабочим характеристикам вместе с требованиями по снижению металлоёмкости и экономичности предъявляют новые условия в обеспечении надежности и долговечности.

Как известно долговечность автомобильной техники закладывается на стадии конструирования, обеспечивается на стадии производства и реализуется при эксплуатации. Для обеспечения долговечности автомобилей необходимо проведение комплекса соответствующих мероприятий на всех трех стадиях ее существования [1].

Эксплуатация автомобильной техники является наиболее длительным периодом жизненного цикла изделия, полнота реализуемых возможностей в процессе эксплуатации автомобилей определяется принятой системой технического обслуживания и ремонта (ТОиР), применяемым технологическим оборудованием, качеством эксплуатационных материалов, квалификацией и мотивацией обслуживающего персонала, принятыми технологическими процессами восстановления работоспособности.

Разработка мероприятий по обеспечению долговечности автомобильной техники должна базироваться на результатах исследований процессов, происходящих в ее элементах в период работы в условиях эксплуатации. В число таких процессов входят:

- процессы изменения параметров деталей вследствие изнашивания;
- старение и усталость материалов деталей;
- процессы изменения параметров деталей вследствие пластических деформаций;
- процессы изменения показателей физико-механических свойств эксплуатационных материалов и материалов деталей под

влиянием окружающей среды в период эксплуатации автомобилей.

Все эти процессы ведут к снижению работоспособности и являются причинами отказов.

Важнейшей составной частью технической эксплуатации и инструментом поддержания работоспособного состояния подвижного состава является система ТО и ремонта.

Цель системы ТО и ремонта в соответствии с ГОСТ 28.001-83 – управление техническим состоянием изделий в течение их срока службы или ресурса до списания, позволяющее обеспечить: заданный уровень (коэффициент) готовности изделий ( $\alpha_r$ ) к использованию по назначению и их работоспособность в процессе эксплуатации; минимальные затраты времени, труда и средств.

Таким образом уровень (коэффициент) готовности является как показателем эффективности работы подвижного состава, так и работы технической службы предприятий.

В современных условиях развития предприятий автомобильной отрасли используется подвижной состав как отечественного производства так и стран дальнего зарубежья, техническое обслуживание которых регламентируется по приведенным в сервисных книжках данным, в которых не указываются дни простоя автомобилей в ТО и ТР. Капитальный ремонт полнокомплектных автомобилей, так же не проводится, поэтому рассчитать величину прогнозируемого уровня (коэффициента) технической готовности по ранее известным нормативам невозможно.

При расчете уровня (коэффициента) технической готовности учитываются простои подвижного состава, связанные с выводом автомобиля из эксплуатации т.е. простои в ТО-2 и ТР. Для автомобиля без планирования капитального ремонта при «идеальных» условиях эксплуатации (без учета простоя автомобиля по организационным причинам, таким как отсутствие водителя, заказа на выполнение работ и прочее) уровень технической готовности определяется по формуле:

$$\alpha_r = \frac{1}{1 + I_{\text{св}} \left( \frac{D_{\text{ТО-2}}^{\text{H}} + D_{\text{ТР}}^{\text{H}}}{1000} \right)}, \quad (1.1)$$

где  $\alpha_T$  – уровень технической готовности;  $D_{\text{ТО-2,ТР}}^H$  – нормативный показатель характеризующий продолжительность простоя подвижного состава автотранспортного предприятия соответственно в техническом обслуживании 1№ и текущем ремонте (ТР), дн/1000 км;  $l_{\text{cc}}$  – пробег автомобиля за сутки, км.

Таким образом на уровень технической готовности влияет интенсивность эксплуатации и срок службы автомобиля.

В виду того, что при этом увеличивается число отказов, а, следовательно, и время простоев в ТО и ремонте, уровень технической готовности определим согласно уравнению 1.2:

$$\alpha_T = \frac{1}{1 + B_p l_{\text{cc}}} = \frac{1}{1 + B_p T_n V_3}, \dots \dots \dots (1.2)$$

где  $B_p$  – время нахождения автомобиля в технических обслуживаниях и ремонтах за счет рабочего времени, дн/1000 км;  $B_p = D_{\text{рц}} / L_{\text{сп}}$ ;  $D_{\text{рц}}$  – цикловой простой автомобиля, дн;  $D_{\text{рц}} + D_{\text{ТР,ТО}}$ ;  $D_{\text{ТР,ТО}}$  – показатель простоя автомобиля в техническом обслуживании и текущем ремонте, дн;  $L_{\text{сп}}$  – пробег автомобиля (наработка) до списания, км;  $T_n$  – время одной смены, ч;  $V_3$  – эксплуатационная скорость, км/ч.

Из выражений (1.1 и 1.2) очевидно, что работоспособность и долговечность автомобиля, как составные показатели уровня технической готовности, зависят от простоя автомобиля в техническом обслуживании и текущем ремонте, а также пробега автомобиля (наработка) до списания. Поскольку величина пробега до списания закладывается при конструировании и не может меняться на стадии эксплуатации, первоочередной задачей технической эксплуатации является снижение простоев в ТО и ремонте путем совершенствования существующих и создания новых технологических и конструкторских разработок, применение эффективных материалов и способов восстановления деталей и узлов автомобилей.

## **1.2. Анализ отказов корпусных деталей, влияющих на надёжность автомобильной техники**

Исследования дефектов корпусных деталей грузовых автомобилей, поступивших в капитальный ремонт, показали, что кар-



тер муфты сцепления, коробок передач и картер ведущих мостов нуждаются в починке. Основными дефектами указанных деталей являются износы посадочных подшипниковых соединений (ПС):

- для картера муфты сцепления – износ отверстия под крышку подшипника первичного вала коробки передач;
- для картеров коробок передач – износы отверстий под подшипники качения;
- для ведущих мостов – износы шеек цапф под подшипники качения.

В работе приведено следующее распределение дефектов картеров: износ посадочных мест под подшипники качения – 65,3 %; поломка, трещины картера коробки передач (КП) автомобилей МАЗ-500А – 9,3 %; выкрашивания, задиры – 21,3 %; срез, смятие, срыв – 4,4 %. По результатам наблюдений за подконтрольной партией автомобилей ЗИЛ, ММЗ-555 определены основные причины отказов элементов коробки передач (табл. 1.1) и их распределение (табл. 1.2).

Таблица 1.1

**Основные отказы коробки передач**

Детали	Причины отказа
Вал первичный	Износ и выкрашивание зубьев шестерни постоянного зацепления
Валы промежуточный и вторичный	Износ посадочных мест под подшипники
Шестерни	Износ, поломка зубьев
Подшипники	Износ, усталостное разрушение
Синхронизатор	Износ колец, излом блокирующих пальцев

Из таблицы 1.2 следует, что при внезапных отказах оборудования основной причиной является усталостный излом.

Средняя наработка на отказ коробки передач грузовых автомобилей составляет 25 тыс. км, доля отказов от общего количества отказов по автомобилю – 5 %, доля трудоемкости их устранения – 8 %, доля расходов на запасные части – 10 %, доля простоев в текущем ремонте – 13 %.

Таблица 1.2

## Распределение отказов КПП по причинам

Причины отказов	Доля, %
Повреждения усталостного характера в виде выкрашивания, трещин, изломов, возникающих в результате действия циклических нагрузок	44,4
Износ валов, втулок, шестерен и других деталей	16,7
Повреждение резинотехнических изделий	16,7
Нарушения регулировок, перетирания из-за вредного контакта элементов конструкции	16,7
Прочие причины	5,5

В работе проведен анализ КПП показателей надёжности  $K_n$  автомобилей семейства КамАЗ в процессе эксплуатации (таб. 1.3).

Таблица 1.3

## Показатели надёжности коробок передач автомобилей КамАЗ

Показатели надёжности	КамАЗ-5320	КамАЗ-5410	КамАЗ-5511
Доля отказов по трансмиссии, %	10,7	16,8	10,6
Доля КП в отказах трансмиссии, %	10,0	9,0	11,2
Средняя наработка на отказ КП, тыс. км	26,8	24,0	10,6
Коэффициент вариации наработки на отказ	0,83	0,97	0,73
Средняя наработка до капитального ремонта КП, тыс. км	142	136	114
Коэффициент вариации наработки до капитального ремонта	0,43	0,44	0,50

Сопоставляя данные таблиц 1.2 и 1.3, становится очевидным, что частота и средняя наработка КПП зависит не только от конструктивных особенностей, но и от условий эксплуатации.

Таблица 1.4

## Результаты дефектовки элементов КПП при капитальном ремонте

Элементы КП	Подлежит замене, %	Подлежит восстановлению, %	Годных без ремонта, %
Картер коробки передач (14.1701015)	23	65	12

Элементы КП	Подлежит замене, %	Подлежит восстановлению, %	Годных без ремонта, %
Вторичный вал (14.1701105)	18	67	15
Синхронизатор 4 и 5 передач	32	60	8
Синхронизатор 2 и 3 передач	8	24	68
Вал первичный	12	34	54
Вал промежуточный	6	16	78
Крышка заднего подшипника первичного вала (14.1701040)	38	56	6
Стакан заднего подшипника промежуточного вала (14.1701078)	10	72	18
Подшипники шариковые	15	52	33
Подшипники роликовые	10	55	35

Анализ технического состояния КПП, позволил установить, что 64 % из них вызваны аварийными повреждениями картеров, подшипников, валов, шестерен. Была выявлена доля заменяемых и восстанавливаемых деталей при ремонте, а также характеристики износа и изменения геометрической формы деталей (табл.1.4 и 1.5).

Наиболее заменяемыми и ремонтируемыми деталями КПП являются: картер, вторичный вал и синхронизатор 4 и 5 передач.

Таблица 1.5

#### Повторяемость дефектов картера КПП автомобилей КамАЗ

Элементы, дефекты и их характеристика	Повторяемость, %
Износ отверстий под подшипники первичного и вторичного валов	42
Износ отверстий под подшипники промежуточного вала	22
Износ торцов от стопорных колец подшипников первичного и вторичного валов	54
Трещины, не проходящие через отверстия под подшипники, ось блока шестерен заднего хода и крепежные отверстия	40
Износ отверстий под шейки блока шестерен заднего хода	15

Элементы, дефекты и их характеристика	Повторяемость, %
Износ резьбы крепежных отверстий	20

Техническое состояние сопряжений агрегатов автомобилей характеризуется следующими показателями: износ, неравномерность изнашивания, зазоры (люфты), площадь усталостного выкрашивания рабочих поверхностей деталей, натяг подшипников.

Таким образом, несмотря на наличие отдельных теоретических разработок по расчету предельных состояний деталей и сопряжений, основным методом их определения в настоящее время является экспериментальный.

Для деталей автомобиля и других механических систем в ремонтно-технической документации используется понятие допустимого износа. Детали, восстановление которых не производится, при наличии износов, достигающих допустимых значений, подлежат выбраковке. К таким деталям, в частности, относятся шестерни (по износу зубьев), валы (по износу некоторых шлицев), подшипники (по величине радиального и осевого зазора) и др. Очевидно, для не восстанавливаемых деталей допустимые износы могут быть использованы в качестве условных критериев предельного состояния. Особенность их использования для прогнозных оценок ресурсов состоит в том, что достижение допустимого износа не означает отказ детали, но при проведении текущего (укрупненного, среднего) или капитального ремонта они подлежат замене. Поэтому использование допустимых износов в расчетах необходимо совмещать с предполагаемой стратегией ремонта агрегата.

Подшипниковые узлы относятся к категории наиболее многочисленных элементов конструкции современной автотранспортной техники и в значительной степени влияют на ее долговечность и работоспособность.

### **1.3. Анализ долговечности подшипниковых узлов автотранспортной техники**

Надёжность работы подшипниковых узлов в значительной степени зависит от посадки наружного кольца в сопряжении кор-

пусных деталей и на осях сопряжений внутреннего кольца подшипника.

Образование зазора в сопрягаемых поверхностях подшипниковых узлов приводит к перераспределению нагрузки в опорах качения и как следствие снижению долговечности подшипникового узла.

Факторы, влияющие на долговечность подшипникового узла, можно условно разделить на две группы:

- эксплуатационные;
- конструкторско-технологические.

Классификация факторов, влияющих на долговечность подшипникового узла, приведена на рис. 1.1.

К конструктивно-технологическим факторам, влияющим на долговечность подшипникового узла, можно отнести:

- технологию изготовления;
- совершенство конструкции.

К эксплуатационным факторам можно отнести:

- соблюдение правил эксплуатации;
- соблюдение системы планово-предупредительных ТО и ремонтов.

Несоблюдение системы ППР в части смазочно-заправочных работ, увеличение пробегов до замены фильтрующих элементов и несвоевременная регулировка опор качения приводит к интенсификации процесса накопления абразивных частиц, перегреву подшипниковых узлов, изменению физико-механических свойств масел и как следствие резкому увеличению износа подшипникового узла.

Отличия от технологии производства и ремонтных работ приводят к дефектам посадочных мест подшипниковых узлов, таких как конусность и овальность, являющихся следствием неравномерного распределения нагрузки между телами качения и способствующих усталостному разрушению поверхностей качения. Несоблюдение соосности посадочных мест и шеек валов приводит к перекосу колец, защемлению тел качения и поломке деталей подшипников.



Рис. 1.1. Классификация причин, приводящих к снижению долговечности подшипников качения

Долговечность подшипниковых узлов в большей степени зависит от качества сборки, которая обеспечивается подбором оптимальной посадки сопрягаемых деталей.

Ослабление посадок сопрягаемых деталей колец подшипников в подшипниковых узлах приводит к проворачиванию колец и как следствие интенсификации процесса изнашивания посадочных мест подшипникового узла [3].

#### 1.4. Анализ причин отказов подшипниковых узлов автотранспортной техники

Опыт использования автомобильной техники, многочисленные исследования, проведенные в области изучения долговечности и различных эксплуатационных свойств подшипниковых узлов показывают, что износ или несоответствие линейных раз-

меров и геометрической формы посадочных мест нормативным требованиям приводят к нарушению скоординированного расположения всех деталей механизмов. В результате этого увеличиваются статические и динамические нагрузки на детали механизмов, повышается интенсивность износа посадочных мест и элементов подшипников качения. Большое значение на точность расположения деталей механизмов во время их эксплуатации оказывает односторонний характер нагрузок, воспринимаемых подшипниками качения, что приводит к относительной деформации стенок корпусных деталей вследствие изменения остаточных линейных напряжений.

В.А. Лангертом отмечается, что изнашивание посадочного места подшипникового узла имеет правостороннюю асимметрию, подчиняется закону распределения Вейбулла с хорошим согласованием по критерию Пирсона.

Основными причинами износа посадочных мест подшипников качения являются проворот колец и фреттинг-коррозия [3].

Фреттинг-коррозия – это коррозия, возникающая на контактирующих металлических поверхностях при минимальном повторяющемся (локальном) перемещении этих поверхностей относительно друг друга в условиях воздействия коррозионной среды. Причиной таких перемещений могут быть вибрации, динамические нагрузки, периодический изгиб или скручивание сопряженных деталей [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

Интенсивность разрушения сопряженных металлических поверхностей при фреттинг-коррозии зависит от физических (относительная твердость поверхностей, температура и пр.), параметров внешнего механического воздействия (амплитуда относительного смещения, удельная контактная нагрузка, частота колебаний, количество циклов нагружения), а также окружающей среды [7, 9].

Фреттинг-коррозия приводит к значительному ухудшению качества поверхностей и заметно (в 3–6 раз) снижает усталостную прочность деталей [9, 10, 11].

Согласно проведенному анализу [12, 13], объём удаляемого материала можно считать пропорциональным числу циклов нагружения, при этом максимальный износ контактирующих по-



верхностей наблюдается при частоте 10...25 Гц, а с увеличением свыше 25 Гц величина износа снижается и находится на определенном уровне» [11, 14].

С увеличением количества циклов нагружения износ возрастает по линейной зависимости [8, 15].

Износ посадочных мест подшипников качения в значительной мере обуславливает появление зазора между кольцами подшипников и сопрягаемыми поверхностями корпусных деталей и валов, что приводит к снижению ресурса подшипникового узла.

По результатам исследования было выявлено, что при износе посадочного отверстия на 0,05 мм удельная нагрузка на зуб шестерни коробки перемены передач увеличивается на 25 %, а ресурс снижается в разы. Эти факты подтвердили наблюдения за работой коробок передач, собранных из новых деталей в неотремонтированном корпусе. Ресурс таких агрегатов составлял 30...40 % от до ремонтного ресурса новых коробок передач [16].

Повышенный износ посадочных мест подшипниковых узлов является причиной уменьшения пятна контакта в зацеплении зубчатых колес и причиной самовыключения передач.

Многочисленные исследования показывают, что износ посадочных мест под подшипники в корпусах коробок передач ЗИЛ-130 составляет 0,08...0,18 мм, а овальность и конусность – 0,01...0,03 мм, в следствии чего до 90 % корпусов коробок передач требуют восстановления» [17, 18, 19].

Следует отметить, что данные, приведенные в литературных источниках, относятся к деталям узлов трансмиссий автомобильной техники. В литературе отсутствуют данные о причинах повреждений, величине и характере износа посадочных мест подшипниковых узлов агрегатов электрооборудования автомобилей.

В связи с чем проведен анализ ремонтного фонда и характера износа посадочных мест под подшипники крышек генераторов на транспортных предприятиях Приднестровья. Анализ результатов измерений (рис. 1.2) показал, что наибольшее сходство распределения износа обеспечивается законом распределения Вейбулла, у которого для всех партий измеряемых деталей  $P(x^2) > P(0,1)$ . Это послужило основой для принятия закона распределения Вейбулла в качестве теоретического закона распределения.

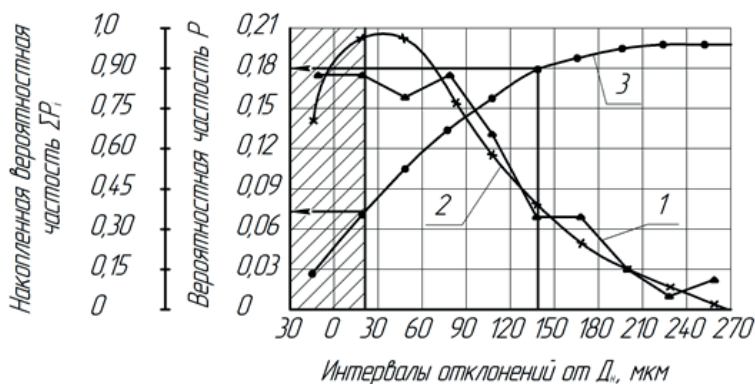


Рис. 1.2. Кривые распределения износа посадочных мест подшипников крышек генераторов автомобилей: 1 – полигон распределения статистических данных; 2 – дифференциальные кривые вероятностного распределения; 3 – интегральная кривая вероятностного распределения

Из гистограммы распределения видно, что годными к дальнейшей эксплуатации являются 36 % крышек генераторов автомобилей по причине износа посадочных мест под подшипники.

Таким образом, подлежат восстановлению 64 % крышек генераторов автомобилей, отправленных на ремонт (из них 54 % имеют износ меньше 0,12 мм). Максимальный износ составляет  $\Delta U_{\max} = 0,24$  мм.

## 1.5. Анализ способов восстановления неподвижных соединений подшипников

Всестороннее изучение и разработка средств и методов восстановления изношенных посадочных мест подшипниковых узлов нашли свое отражение в научно-исследовательских и научно-практических работах. Большой вклад в развитие технико-технологических процессов восстановления изношенных мест подшипниковых узлов внесли: В.А. Белый, В.В. Курчаткин, М.В. Авдеев, И.В. Коляско, К.А. Ачкасов, А.Н. Батищев, Е.Л. Воловик, Р.И. Ли, Л.В. Дехтеринский, А.А. Гаджиев и другие ученые.

Большинство способов восстановления посадочных мест подшипниковых узлов имеют общие недостатки:

- потребность в дорогостоящем технологическом оборудовании;
- сложность технологического процесса;
- необходимость механических воздействий на восстановленные детали;
- высокая трудо-, энерго- и материалоемкость и как следствие себестоимость операции.

Согласно опыту [21], трудоемкость восстановления составляет 10...120 ч/м<sup>2</sup>, энергоемкость 100...256 кВт×ч/м<sup>3</sup>, расход материала 1,5...50 кг/м<sup>2</sup>, а основную причину износа посадочных мест подшипников качения – фреттинг-коррозию не предотвращают.

Применение полимерных материалов при восстановлении посадочных мест подшипниковых узлов исключают вышеперечисленные недостатки [3, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28].



Рис. 1.3. Классификация способов восстановления посадочных мест подшипниковых узлов качения

Восстановление неподвижных соединений подшипниковых узлов ремонтными полимерными материалами осуществляется двумя способами:

- нанесением полимерного покрытия на посадочное место с последующим формованием под номинальный размер;
- склеиванием одного из колец подшипника с сопрягаемой деталью [29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38].

При восстановлении посадочных мест подшипников качения наибольшее распространение получили эластомеры, анаэробные герметики и композиционные материалы на их основе [39]. В качестве составных элементов композиции используются наполнители (стекольная мука, железный порошок, алюминиевая пудра и др.) и пластификаторы (дибутилфталат, диоктилфталат и др.) [40].

Эпоксидные полимеры и композиции на их основе обладают высокими адгезионными свойствами, механической прочностью, тепло-, водо-, и химической стойкостью [14], они способны отверждаться при широком спектре температур.

В работе [41] предлагается восстановление неподвижного соединения подшипника качения, заключающееся в нанесении на изношенную поверхность корпуса подшипникового узла слоя эпоксидной композиции с дальнейшей калибровкой после частичного отверждения покрытия. Состав полимерной композиции используется на основе эпоксидной смолы ЭД-16, отвержденной низкомолекулярной полиамидной смолой Л-19, или полиэтиленполиамином (ПЭПА) на основе клея компаунда К-115, отвержденного отвердителем АФ-2. Предложенный способ позволяет получать восстановленные посадочные места подшипников с номинальным размером, не требующим механической обработки.

А.А. Гаджиевым разработан усовершенствованный способ формования, покрытий под воздействием внешних силовых полей, заключающийся в том, что эпоксидная композиция наносится шпателем на изношенные посадочные места под подшипники качения, выдерживается в течении 1 часа на воздухе при нормальных условиях с воздействием на них силовых полей, после чего производится формование путем протягивания калибрую-

щей оправки вдоль оси отверстия на сверлильном станке. Далее производится отверждение эпоксидного покрытия по ступенчатому режиму при температурах 30 °С в течении двух часов, 100 °С и 150 °С, одного и одного часа соответственно. Состав ремонтной полимерной композиции: ЭД-16 – 100 частей, АСТ-Т – 35 частей, дибутилфталат – 20 частей, АФ-2 – 10 частей, 6Ф – 15 частей, алюминиевая пудра – 10 частей в сочетании с ультразвуковой и электромагнитной обработкой позволил значительно улучшить ее деформационно-прочностные свойства.

Способ формования полимерной ремонтной композиции на посадочных местах подшипниковых узлов имеет следующие недостатки: потребность в расточном и прессовом оборудовании, длительность формования и отверждения нанесенного покрытия.

Указанные недостатки вышеприведённого способа восстановления устраняются путем склеивания кольца подшипника с корпусной деталью опоры качения.

Наибольшее распространение при восстановлении неподвижных соединений путем склеивания получили анаэробные герметики, т.к. они обладают хорошей адгезией к металлам, стойкостью к действию воды, масла, топлива, органических растворителей, кислот, щелочей и других химических веществ, сохраняя свои потребительские свойства после отверждения в интервале температур 60–150 °С. [42, 43, 44]. На отечественном рынке наиболее распространённым производителем герметиков является ФГУП «НИИ полимеров им. академика Каргина», выпускающий большое количество герметиков марок «Анатерм» и «Унигерм», из импортных поставщиков наиболее распространёнными фирмами являются «LOCTAIT» и «THREEBOND».

При вклеивании наружного кольца в отверстие корпусной детали, используются специальные центрирующие приспособления, позволяющие обеспечить требуемую соосность. Наибольшее распространение при использовании указанной технологии получили анаэробные герметики серии АН и УГ [20, 21, 36, 37, 11, 14, 40].

Анаэробные герметики, применяемые при восстановлении подшипниковых узлов опор качения, повышают долговечность в 3,6 раза по сравнению с новыми [36], благодаря перераспределению нагрузки между телами качения [45].

Недостатком способа являются: потребность в специальных центрирующих приспособлениях, необходимость вертикального расположения соединения, низкая стойкость герметиков к циклическим нагрузкам, приводящая к образованию трещин.

Указанный недостаток решается введением дисперсных наполнителей в том числе наноразмерных частиц. Введение наноразмерных частиц в анаэробные герметики повышает их прочность и выносливость, сокращает время отверждения, повышает ресурс до 1,42 раза в сравнении с ненаполненными полимерными материалами [46].

## **1.6. Анализ долговечности полимерных материалов и восстановленных ими изношенных подшипниковых узлов**

Согласно приведенного выше анализа наиболее простым способом повышения долговечности изношенных мест подшипниковых узлов при ремонте подвижного состава является их восстановление ремонтными полимерными материалами. Этот способ полностью исключает контакт сопряженных поверхностей, что способствует снижению динамических нагрузок и предотвращает проворачивание наружного кольца подшипника.

Резкое отличие вязкоупругих физико-механических и теплофизических свойств металлов и полимеров влияет на характер проявления и развития напряжений в неподвижном соединении с полимерным покрытием в нагруженном состоянии [3].

Число циклов при динамическом нагружении влияет на долговечность подшипниковых узлов. Было [20] выявлено, что при динамическом нагружении и посадке подшипника без полимерного покрытия наименьшей долговечностью обладают соединения с зазором в сопряжении 0,02 мм (рис. 1.4, кривая 1), а долговечность неподвижного соединения с натягом 0,02 мм в 2 раза выше (рис. 1.4, кривая 2). При испытании в течении 270 часов подшипника качения с полимерным покрытием из термообработанного герметика бФ износ посадочного отверстия не выявлен.

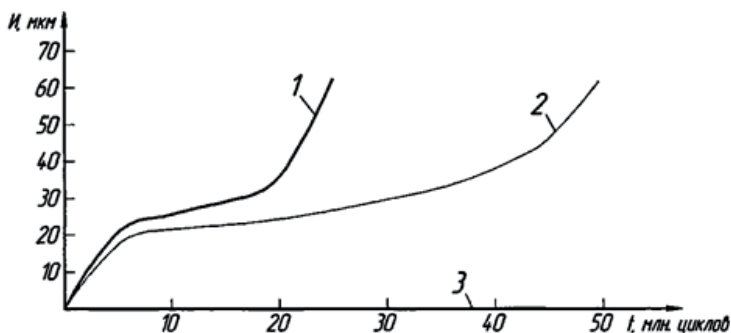


Рис. 1.4. Зависимость износа посадочных мест от наработки при различных видах неподвижных соединений: 1 – посадка с зазором 0,02 мм; 2 – посадка с натягом 0,02 мм; 3 – с покрытием посадочного места подшипника качения термообработанным герметиком 6Ф

Динамические нагрузки, возникающие в узлах автомобилей, при его эксплуатации изменяются с течением времени по знаку и значению. Такой вид нагружения называется циклическим.

Различают следующие виды циклов нагружения: знакопостоянный цикл (рис. 1.5, а) – напряжение меняет только числовое значение; знакопеременный цикл (рис. 1.5, б) – цикл, в котором напряжение меняется по знаку и значению; пульсирующий цикл (рис. 1.5, в) – знакопостоянный цикл, в котором напряжение меняется от нуля до максимального значения; симметричный цикл (рис. 1.5, г) – знакопеременный цикл, в котором абсолютные значения максимальных напряжений различного знака равны [47].

Под действием циклических нагрузок в неподвижных соединениях подшипниковых узлов, восстановленных полимерными материалами, возникают напряжения сжатия, сдвига и растяжения. Длительное воздействие этих напряжений приводит к постепенному накоплению повреждений в слое полимерного материала, что приводит к образованию и развитию трещин и как следствие разрушению детали.

Модель разрушения ремонтных полимерных композиционных материалов, используемых при восстановлении посадочных мест подшипниковых узлов, состоит из трех этапов и представлена на рис. 1.6 [48, 49, 50].



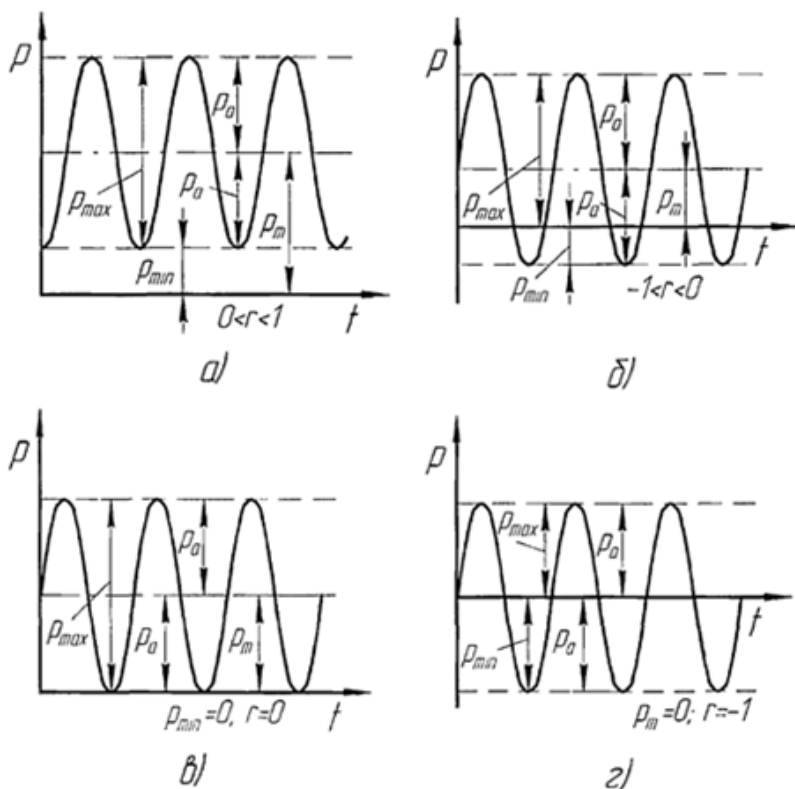


Рис. 1.5. Виды циклического нагружения: а – знакопостоянный цикл; б – знакопеременный цикл; в – пульсирующий цикл; г – симметричный цикл

На первом этапе происходит накопление напряжений, которые способствуют появлению локальных разрывов межмолекулярных связей, что приводит к зарождению микротрещин. На втором этапе дальнейшее действие циклических нагрузок способствует накоплению микропор, что ведет к разрыхлению материала и дальнейшему росту первичной микротрещины.

На третьем этапе [14] микротрещина достигает микроскопических размеров, мгновенно прорастая через всё сечение образца и вызывая его разрушение.

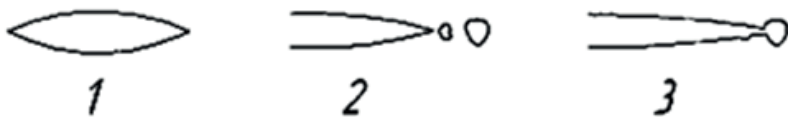


Рис. 1.6. Модель роста трещины в полимерном материале при циклическом нагружении

Для определения циклов нагружения до разрушения полимерного материала при циклическом нагружении в аналитической форме можно применить зависимость [51]:

$$N = K(\sigma - \sigma_b)^{-m}, \quad (1.9)$$

где  $N$  – число циклов нагружения до разрушения;  $\sigma$  – напряжение;  $\sigma_b$  – предел выносливости;  $K$ ,  $m$  – коэффициенты, зависящие от свойств полимерных материалов и режима нагружения соответственно.

Из выражения (1.9) можно представить типовую зависимость (рис. 1.7).

Выносливость ремонтных полимерных композиционных материалов зависит от температурных факторов; толщины клеевого шва; амплитуды деформации при циклическом напряжении и амплитуды напряжений при циклическом нагружении; среднего напряжения и средней деформации; частоты циклов нагружения.

По мере ухудшения свойств полимерных материалов из-за накопления внутренних напряжений, переходящих затем в микротрещины, происходит разрушение детали, при этом из выражения 1.3 видно, что количество циклов до разрушения материала зависит от его свойств, режима нагружения и максимальных действующих напряжений.

Введение наполнителей в состав ПКМ повышает их прочность, трещиностойкость и выносливость, увеличивает их ресурс [52]. Так сравнительный анализ результатов стендовых и эксплуатационных испытаний подшипниковых узлов, восстановленных полимерными композиционными материалами, показал, что долговечность их выше в сравнении с ненаполненными полимерными материалами [3, 21, 37].

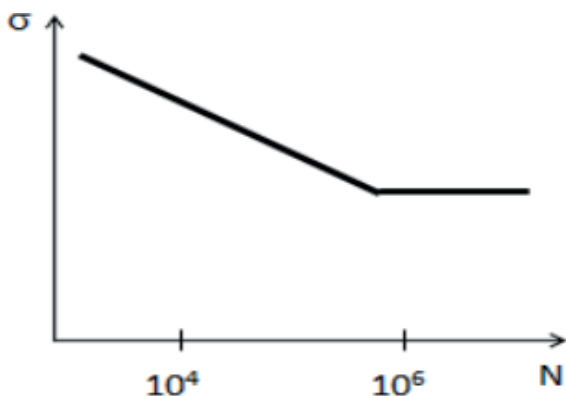


Рис. 1.7. Типовая зависимость между амплитудой напряжения  $\sigma$  и логарифмом числа циклов  $N$  нагружения до разрушения ПКМ

Перечисленные недостатки сдерживают широкое применение эпоксидных и других склеивающих композиций для восстановления посадочных поверхностей корпусных деталей.

Для восстановления посадочных мест подшипниковых узлов автомобилей наиболее эффективно применение термопластичных полимеров и композиций на их основе [53]. Выбирая тот или иной состав композиции, можно получить покрытия с заранее заданными свойствами. Процесс нанесения покрытия легко поддается механизации и автоматизации, практически позволяет использовать весь исходный материал, т.е. обеспечить безотходную технологию. Нанесенные покрытия обладают высокими физико-механическими свойствами, позволяют получить большую толщину, легко поддаются механической обработке.

На рис. 1.8 приведена классификация способов нанесения полимерных композиций, применяемых в ремонтном производстве.

Из имеющихся способов нанесения термопластичных полимеров и их композиций наиболее перспективным служит способ получения полимерных покрытий из порошкообразных композиций, так как он является наиболее универсальным и характеризуется легкостью нанесения и способностью к тонкослойному распределению расплава полимера на покрываемой поверхности.



Рис. 1.8. Классификация способов нанесения полимерных композиций для восстановления деталей машин

Сущность способа получения покрытий из порошков заключается в том, что частицы полимера наносятся на горячую или холодную деталь, где под действием температуры оплавляются, образуя сплошное покрытие.

Наиболее перспективным способом нанесения порошков на восстанавливаемые поверхности посадочных мест под подшипники является электростатический. Он основан на способности полимерных порошков приобретать электрический заряд при помещении их в электростатическое поле высокого напряжения с последующим их переносом на покрываемую деталь [54]. Способ отличается возможностью механизации и автоматизации технологического процесса, высокой производительностью, легкостью регулирования толщины покрытия, позволяет покрывать изделия, изготовленные из неоднородных материалов. При сочетании электростатического и вибровихревого (камерного) способов можно получить покрытия толщиной 1...2 мм [55]. Однако существующие составы композиций для камерного электростатического способа не обеспечивают требований современного ремонтного производства, предъявляемые к покрытиям, применяемым для восстановления посадочных мест под подшипники

качения, а существующее оборудование не позволяет получать равномерные покрытия по всей поверхности отверстия.

Анализ существующих способов нанесения покрытий показал, что наиболее приемлемым для восстановления посадочных мест подшипниковых узлов опор качения является камерный электростатический способ. При этом, из опыта эксплуатации, анализа износа посадочных мест и конструктивных особенностей указанного класса деталей, установлено, что требуется усовершенствование, как самого способа, так и применяемого оборудования.

Существенным резервом повышения качества восстановленных деталей является обоснование состава полимерной композиции для формирования покрытий. Наряду с этим, анализ данных литературы показал, что известные порошкообразные полимерные композиции для электростатического напыления не в полной мере обеспечивают необходимые свойства покрытий.

Для восстановления деталей, воспринимающих колебательные нагрузки и работающих в агрессивных средах, рекомендуется применять полиамидные покрытия [56].

Перспективными являются порошки на основе полиамида 12-полимерный материал, отличающийся комплексом ценных физико-механических, технологических и эксплуатационных свойств.

Покрытия, полученные из П-12, обладают удовлетворительной износостойкостью, широким интервалом температур эксплуатации ( $-20... +100$  °С), хорошо поглощают ударные нагрузки [57]. Однако частицы полиамидных порошков при нагреве плохо сохраняют электрический заряд из-за снижения электрического сопротивления, что усложняет процесс получения покрытий в электрическом поле. Покрытия из полиамидов имеют значительную усадку и большие внутренние напряжения, а их адгезионная прочность недостаточна [58]. Эти особенности ограничивают возможность их использования в качестве покрытий для восстановления посадочных мест подшипниковых узлов.

В настоящее время промышленностью освоен выпуск различных эпоксидных порошковых полимеров, которые используются для создания защитно-декоративных покрытий. Указанные по-

рошки быстрее заряжаются в электрическом поле и полнее концентрируют заряд. Покрытия, полученные из них, обладают хорошей адгезионной прочностью и твердостью [58], но применять эти покрытия в чистом виде для восстановления посадочных мест подшипниковых узлов невозможно, ввиду их большой хрупкости и низкой износостойкости.

Стоит предположить, что свойства полиамидных покрытий можно целенаправленно изменять введением в них эпоксидных олигомеров. Это должно способствовать, с одной стороны, улучшению электроосождаемости порошкообразных частиц композиции, повышению адгезионной прочности, с другой стороны, полиамид должен придать покрытиям повышенную ударную прочность и гибкость [58]. Твердость, износостойкость и стабильность размеров покрытий можно повысить путем наполнения композиции стекольной мукой [52].

Основываясь на предоставленных данных, можно заключить, что создание полимерной композиции на основе полиамида П-12 и эпоксидного олигомера с использованием в качестве наполнителя стекольной муки позволит получить покрытия на изношенных поверхностях посадочных мест подшипниковых узлов с необходимыми физико-механическими свойствами. Однако, в литературе имеется мало рекомендаций по созданию таких композиций из порошкообразных полимеров, а механизм воздействия наполнителей на физико-механические свойства покрытий мало изучен.

Таким образом, использование ремонтных полимерных композиционных материалов при восстановлении неподвижных соединений подшипниковых узлов является актуальной задачей, решение которой позволит повысить надежность автотранспортной техники и снизить расходы на ее техническое обслуживание и ремонт. В связи с этим необходимо провести теоретическое обоснование повышения долговечности ремонтных полимерных композиционных материалов при введении дисперсных наполнителей, в частности в вопросе повышения несущей способности полимерных композиций [47].

## ГЛАВА 2. ОБЩАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1. Объекты исследования

В связи с тем, что полимерная композиция предназначена для восстановления узлов опор качения автомобильной техники, состав композиции выбран с учетом эксплуатации восстановленных деталей в тяжелых эксплуатационных условиях.

Покртия, применяемые для восстановления посадочных мест подшипниковых узлов опор качения, должны обладать высокой адгезионной и ударной прочностью, устойчивостью к агрессивным средам и высоким температурам. Кроме этого покрытия, используемые для восстановления посадочных мест корпусных деталей, должны обеспечить возможность многократного монтажа и демонтажа восстановленных подшипниковых узлов (т.е. обладать высокой износостойкостью при сборке, эксплуатации и разборке). Таким образом, износостойкость целесообразно считать доминирующим показателем качества восстановленных посадочных мест корпусных деталей и при оптимизации состава композиции стремиться к достижению ее максимального значения.

Вторым важным показателем качества восстановленных посадочных мест корпусных деталей является возможность противостоять ударным нагрузкам. Установлено, что нормальные условия эксплуатации подшипниковых узлов обеспечиваются при ударной прочности покрытий не менее  $4,6 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . [59].

Следует отметить, что важным показателем являются свойства самих порошков и их способность к электроосаждению. Для обеспечения нормальных условий нанесения покрытий предельное электроосаждение порошкообразных композиций, предназначенных для нанесения в электростатическом поле, должно быть не ниже  $150 \text{ г}/\text{м}^2$ .

Таким образом, полимерная композиция, применяемая для восстановления посадочных мест подшипниковых узлов, должна



обеспечить электроосаждение порошкообразной композиции не менее  $150 \text{ г/м}^2$ , максимальную износостойкость при монтаже, эксплуатации и демонтаже подшипниковых узлов ударную прочность покрытия не менее  $4,6 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Эти показатели являются основными критериями при оптимизации состава композиции.

Остальные свойства композиции могут иметь компромиссные значения, но не ниже, чем у покрытий, полученных из чистого компонента с худшими показателями.

Оптимальный состав композиции определяли в два этапа. На первом этапе выбрали составляющие композиции и изучили зависимость физико-механических свойств от процентного содержания компонентов. На втором этапе осуществили поиск оптимального состава композиции.

Влияние наполнителя на качество композиции наименее предсказуемо, поэтому исследования проводили для пяти уровней содержания.

В качестве критериев оптимизации состава композиции приняты предельное электроосаждение порошка, ударная прочность покрытия и износостойкость восстановленных посадочных мест подшипниковых узлов при монтаже и демонтаже подшипников.

Порошковую композицию готовили путем сухого смешивания в шаровой мельнице в течение 1 ч. при скорости вращения барабана  $80\text{...}100 \text{ м}^{-1}$  с последующим просевом через вибросито с сеткой № 0,2.

Состав композиции: полиамид 12, эпоксидный олигомер П-ЭП-219 и стекольная мука.

Композицию наносили камерным электростатическим способом (рисунок 2.1) с последующим оплавлением в термопечи при температуре  $220 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 10 мин.

Адгезионную прочность определяли для покрытий, нанесенных на образцы из стали 45 и АЛ-4 по методике, приведенной на рисунке 2.4, ударную прочность – для покрытий, нанесенных на плоские образцы. Износостойкость посадочных соединений оценивали по числу циклов сборки-разборки сопряжений с начальным натягом  $20 \text{ мкм}$  до достижения нулевого положения испытуемых сопряжений, т.е. до достижения постоянного размера посадочного места подшипника.

В результате анализа экспериментальных данных были получены результаты, описывающие зависимость физико-механических свойств от процентного содержания составляющих композиций:

- с увеличением количества П-ЭП-219 увеличивается адгезионная прочность и электроосаждение порошка остальные показатели уменьшаются;

- с увеличением количества пылевидного стекловолокна возрастает износостойкость при сборке, эксплуатации и разборке;

- для анализа ударной прочности состав композиции меняется неоднозначно.

Поиск оптимального соотношения компонентов композиции показал, что максимальное значение по циклам сборки и разборки соединений с начальным натягом 20 мкм до достижения нулевого положения равняется 8, а ударная прочность при этом не снизилась ниже значения 4,6 Н·м. Таким образом, оптимальный состав композиции является: эпоксидный олигомер – 32...40 %, стекольная мука – 9,8...11,6%, полиамид 12 – остальное.

Физико-механические свойства композиции для условий предельного содержания составляющих приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

**Физико-механические свойства порошков и покрытий,  
полученных из рекомендуемой композиции**

Состав композиции			Физико-механические свойства				
полиамид 12	П-ЭП-219	стекольная мука	ЭОП, г/м <sup>2</sup>	n	у, Н·м	адгезионная прочность, МПа	
						сталь 45	АЛ4
66,4	32	11,6	162	8	4,77	29,2	18,16
58,4	40	11,6	174	8	4,6	29,35	18,15
68,2	32	9,8	162	8	4,9	28,86	20,16
60,2	40	9,8	174	8	4,73	30,85	21,07

\*ЭОП – электроосаждение порошка, г/м<sup>2</sup>; n – количество циклов сборки и разборок соединений с начальным натягом 20 мкм до достижения нулевого положения; у – ударная прочность Н·м.

Таким образом, разработанная композиция обеспечивает получение покрытий с высокой износостойкостью (n=8), хорошей

электроосаждаемостью порошка (ЭОП – 162–174 г/м<sup>2</sup>) и высокой ударной прочностью ( $\gamma = 4,6\text{--}4,9$  Н·м). Эти показатели делают возможным применение композиции для восстановления изношенных посадочных мест подшипниковых узлов. Однако следует отметить, что покрытия, полученные из указанной композиции на подложках из сплавов алюминия, имеют недостаточную адгезионную прочность. Поэтому поиск путей ее повышения является актуальным, а решение этого вопроса позволит создать надежную технологию восстановления посадочных мест подшипниковых узлов опор качения.

## **2.2. Экспериментальные установки, оснастка, приборы и образцы**

Процесс нанесения и формирования покрытий в лабораторных условиях производили на двух установках, одна – для нанесения и формирования покрытий, другая – для изучения растекания расплавов полимеров.

Установка для нанесения и формирования покрытий (рис. 2.1) состоит из ванны кипящего слоя 4, источника высокого напряжения 13, источника УЗК-11, колебательной системы 10 и приборов регистрирования и наладки технологических режимов и параметров УЗК.

Ванна состоит из трех камер: нижняя – воздушная камера, верхняя – камера сбора лишнего порошка и передачи ультразвуковых колебаний, средняя – рабочая камера. Ванна установлена на электромеханическом вибраторе 1 при помощи трех упругих опор.

Нижняя и средняя камеры разделены пористой перегородкой 9. Над перегородкой установлено кольцо с электродной сеткой 8, которое подключено к источнику высокого напряжения. Покрываемые образцы устанавливаются над рабочей камерой и прижимаются волноводом 10.

Источником ультразвуковых колебаний является широкополосный ультразвуковой генератор УЗГ-1 с диапазоном частотой от 10 до 40 кГц.

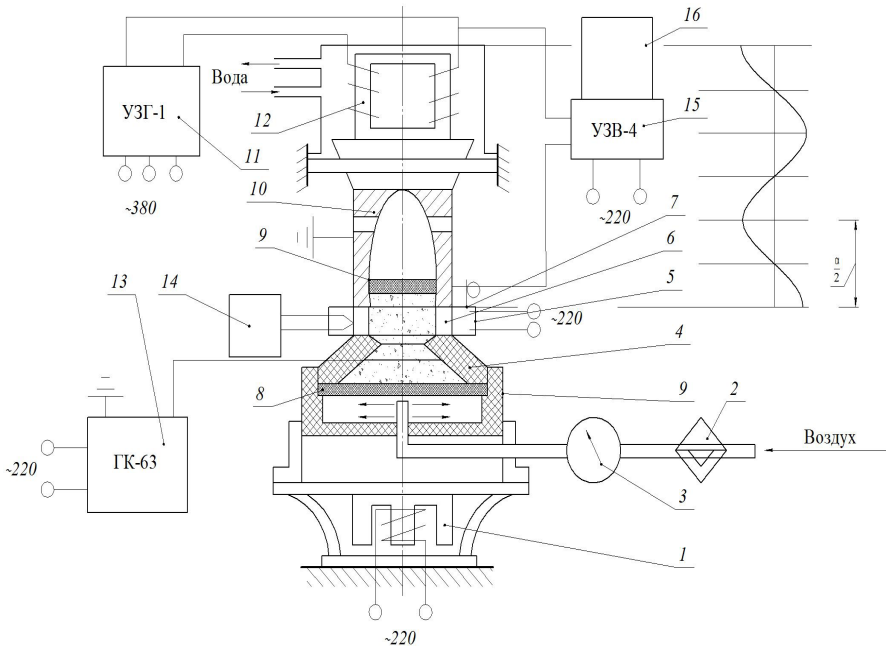


Рис. 2.1. Схема лабораторной установки для нанесения и формирования покрытий: 1 – электромагнитный вибратор; 2 – фильтр-влажнотделитель; 3 – манометр; 4 – ванна кипящего слоя; 5 – нагреватель; 6 – покрываемая деталь; 7 – полимерное покрытие; 8 – кольцо с электродной сеткой; 9 – пористая перегородка; 10 – волновод; 11 – генератор ультразвуковой; 12 – магнитострикционный преобразователь; 13 – генератор каскадный; 14 – терморегулятор; 15 – виброметр; 16 – осциллограф

Колебательная система установки состоит из двух элементов: активного и пассивного.

Активным элементом являются серийные магнитострикционные преобразователи типа ПМС-15А-18.

В качестве пассивного элемента использован специальный акустический трансформатор колебаний – экспоненциальный волновод, который одновременно служит и устройством сбора излишков порошка.

Все элементы колебательной системы строго увязываются между собой по акустическим и механическим параметрам. В

качестве материала для их изготовления используется сталь 45 и алюминиевый сплав Д-16Т.

Резонансную частоту колебательной системы определяли с помощью электронно-счетного частотомера ЧЗ-35А, амплитуду механических колебаний наконечника волновода – виброметром УЗВ-4.

В качестве источника высокого напряжения использовали каскадный генератор КГ-63. Величину напряжения регулировали лабораторным автотрансформатором ЛАТР-2М и контролировали показанием вольтметра, расположенного на панели управления.

Измерение и наладка технологических режимов и параметров УЗК осуществляли с помощью электронно-лучевого осциллографа ОЭШ-70, частотомера электронно-счетного ЧЗ-35А, звукового генераторе ЗГ-14, потенциометра.

Принцип работы установки основан на совмещении камерного электростатического способа нанесения покрытия с активным воздействием на процесс формирования покрытия УЗК.

Полимерный порошок дисперсностью 80...200 мкм, псевдосжиженным вибро-вихревым способом, под действием электростатических сил переносится на заземленную деталь. Электризация порошка происходит в результате воздействия на него электростатического поля.

Деталь, с осевшим на ней полимерным порошком, нагревается до сплавления частиц полимера и образования сплошной пленки. Во время формирования покрытия на деталь воздействуют УЗК.

Установка для изучения растекания расплавов полимеров (рис. 2.2) была скомпонована на базе ультразвукового диспергатора УЗДН-2Т. Конструкция установки позволяет одновременно наблюдать за формированием капли полимера в УЗП и в обычных условиях. Динамику формирования капли фиксировали при помощи микроскопа электрического, модели ММУ-3 модернизированного цифровым видеоокулярном с подключением к персональному компьютеру. Конечное увеличение с цифровым окуляром  $\times 1000$  раз. Программное обеспечение S-EYE версия 1.6.0.11 от 24 апреля 2020 г.

Температурные режимы обоих образцов поддерживали на одинаковом уровне посредством двух терморегуляторов.

Анализ распределения износа посадочных мест под подшипники в крышках генераторов проводили на специальной установке (рис. 2.3).

Принцип работы установки основан на построении круглограмм износа посадочных мест по отношению к базовой поверхности. Отклонения измеряли индикаторным нутромером ГОСТ 9244-75 с ценой деления 0,002 мм.

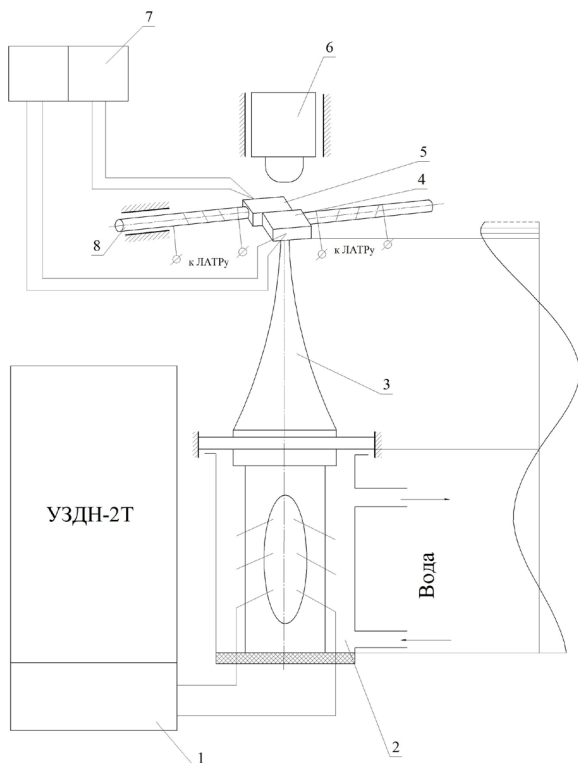


Рис. 2.2. Схема установки для изучения динамики растекания расплавов полимеров: 1 – ультразвуковой диспергатор; 2 – магнитострикционный преобразователь; 3 – волновод; 4, 5 – образцы; 6 – электронный микроскоп; 7 – терморегуляторы; 8 – нагреватели

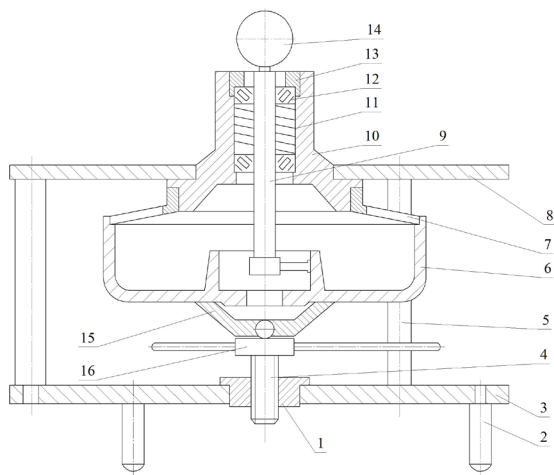


Рис. 2.3. Схема установки для измерения износа посадочных мест подшипников крышек генераторов: 1 – гайка; 2 – опоры; 3 – нижний диск; 4 – ходовой винт; 5 – перегородка; 6 – контролируемая деталь; 7 – установочные мембраны; 8 – верхний диск; 9 – штанга нутромера; 10 – корпус; 11 – пружина; 12 – конические роликовые подшипники; 13 – регулировочный диск; 14 – индикаторная головка; 15 – пята; 16 – прижимной механизм

Установка состоит из нижнего 3 и верхнего 8 дисков, соединенных между собой тремя стойками 5. На верхнем диске установлен вращающийся в двух конических подшипниках индикаторный нутромер 9. Подшипники установлены в корпусе 10, в котором запрессована тарельчатая мембрана 7. Наружная поверхность установочной мембраны отшлифована в сборе с корпусом. При этом базирование выполнено по посадочным отверстиям под конические подшипники. Это обеспечивает точное расположение установочной поверхности тарельчатой пружины относительно центра вращения измерительного нутромера.

Измеряемая деталь 6 устанавливается замковой поверхностью на тарельчатую мембрану и фиксируется прижимным механизмом 16 через пята 15, которая расположена на нижнем диске.

В ходе проведения исследований на установке измеряли износ посадочных мест под подшипники в крышках генераторов. Анализ распределения износа проводили для отверстий в крыш-

ках, изготовленных из алюминиевых сплавов и стали с номинальным размером посадочного отверстия 72 мм. Количество крышек в каждой партии принимали по 100 шт. В качестве информации для построения кривых распределения принимали разницу между номинальным диаметром посадочного отверстия и показанием индикатора. Значение износа определяли, как положительную разницу между допустимым предельным значением посадочного отверстия и действительным максимальным размером изношенного посадочного отверстия.

Адгезионную прочность определяли на образцах, имеющих форму втулки и изготовленных из стали и алюминиевых сплавов. В образцах были высверлены пять конических отверстий, в которые вставляли конические штифты с последующей их притиркой по месту (рис. 2.4).

Реологические свойства полимерных композиционных материалов образца в восстановленном подшипниковом узле определяли методом динамомеханического анализа (ДМА) (рис. 2.5) [60].

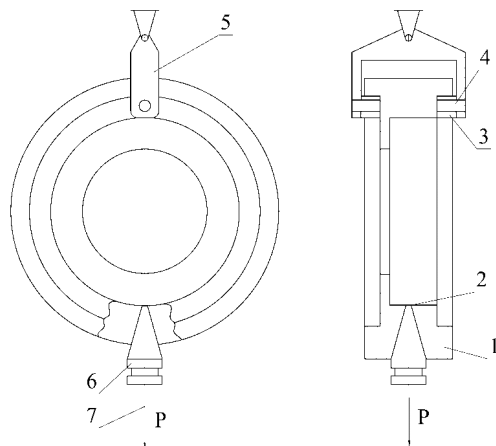


Рис. 2.4. Схема приспособления для определения адгезионной прочности методом штифтов: 1 – образец; 2 – ПКМ; 3 – ролик; 4 – ось ролика; 5 – механизм самоцентрирования; 6 – штифт; 7 – усилие разрыва





Рис. 2.5. Общий вид прибора DMA 242 E Artemis

Типовой прибор ДМА (DMA 242 E Artemis) состоит из измерительной части, систем нагрева и охлаждения, а также контроллеров. Методика проведения испытаний регламентируется международными стандартами: DIN 53513, DIN 53440, ASTM D 4065, ASTM D 4092 [61].

При использовании метода ДМА применяли плоские прямоугольные образцы, к которым прикладывали осциллирующую нагрузку, амплитуду и частоту которой задавали в широком диапазоне.

Проводя эксперимент, применяли следующие режимы испытаний: частота колебаний 1 Гц; амплитуда 60 мкм; динамическая сила 7 Н; статическая сила 0,5 Н; коэффициент пропорциональности 1,1; скорость подъема температуры 2 К/мин.

Вязкоупругие и термомеханические свойства полимерных материалов исследовали на полимерном образце, представляющем собой плоский прямоугольник размерами  $12 \pm 0,1$  мм и высотой  $15 \pm 0,1$  мм.

По истечении заданного времени испытания образец извлекался из прибора и после отдыха в течение 12 часов его высота измерялась повторно.

По полученным на приборе DMA 242 E Artemis данным определяли мгновенный модуль упругости, значения начальной и конечной вязкости, времени релаксации, константы старения, вязкого течения и др.

Полученные результаты обрабатывали с учетом положений теории упругости и пластичности по методике, предложенной в п/п 2.4.

### **2.3. Методика исследования технологических, физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий**

С целью повышения адгезионных свойств покрытий, полученных из разработанной композиции на подложках из сплавов алюминия, проводили исследования по влиянию ультразвуковых колебаний. Исследования проводили методом фотографирования и микрофильмирования с последующим анализом результатов. Для этого на двух образцах, один из которых подвергали ультразвуковому воздействию, устанавливали кубики с нанесенным полимером. Зоны их расположения выбирали из условий обеспечения возможности одновременного наблюдения за обоими образцами.

Растекание изучали при температуре подложки (180–220) °С [58] до полного формирования капли.

В ходе проведения исследований были изучены адгезионная прочность, влагопоглощаемость, плотность, ударная прочность, твердость, стабильность адгезионной прочности и долговечность покрытий.

Адгезионную прочность оценивали величиной усилия, необходимой для нормального отрыва конусообразных штифтов (метод штифтов) [54]. Разрыв штифтов осуществляли на разрывной машине МР-05. Центрирование оси штифта относительно растягивающего усилия достигалось за счет использования приспособлений, приведенных на рис. 2.4.

Диаметр штифта в месте контакта с покрытием выбирали с учетом соблюдения следующего условия:

$$d \leq 4\delta \frac{[\tau_{cp}]}{[\sigma]}, \quad (2.1)$$

где  $\delta$  – толщина покрытия;  $\tau_{cp}$  – допустимое напряжение на срез покрытия;  $\sigma$  – допустимое напряжение прочности сцепления покрытия.

Для обеспечения более плотного прилегания штифтов в конусных отверстиях подложки штифты и сверла обрабатывали с одной установки. Впоследствии штифты притирали по месту и обрабатывали совместно с покрываемой поверхностью.

Центрирование оси штифта относительно растягивающего усилия достигалось за счет использования приспособлений для самоцентрирования штифтов (рис. 2.4.).

Влагопоглощаемость оценивали по количеству дистиллированной воды, поглощенной покрытиями (ГОСТ 4650-2014 (ISO 62:2008)).

Плотность определяли флотационным методом по ГОСТ 15139-69.

Ударную прочность определяли по ГОСТ 4647-2015.

Реологические свойства полимерных композиционных материалов образца в восстановленном подшипниковом узле определяли в следующей последовательности [60]:

– величины пластических деформаций  $\varepsilon_n$ , исходя из принципа аддитивности деформаций, через текущую высоту  $h(t)$  образца:

$$\varepsilon_n = \ln \left[ h(t) / (h_0 - \Delta h_y) \right], \quad (2.2)$$

где  $h_0$  – исходная высота образца;  $\Delta h_y$  – упругая деформация.

– величины упругих деформаций через выражение (2.3):

$$\varepsilon_y = \ln \left[ (h_0 - \Delta h_y) / h_0 \right]. \quad (2.3)$$

– величину фактического напряжения через выражение (2.4):

$$\sigma = 4F / (\pi d_0^2) h(t) / h_0, \quad (2.4)$$

где  $F$  – статическая сила;  $d_0$  – диаметр образца.

– мгновенный модуль упругости  $E$ :

$$E = \sigma_y / \varepsilon_y, \quad (2.5)$$

где  $\sigma_y = \sigma$  (при  $h(t) = h_0 - \Delta h_y$ ) – напряжения, отвечающие упругой деформации.

– модуль сдвига, учитывая малую сжимаемость, через соотношение (2.6) [51]:

$$G = E / 3. \quad (2.6)$$

– скорость пластической деформации через выражение (2.7):

$$\frac{d\varepsilon_n}{dt} = \frac{\sigma}{\tilde{\eta}} = \sigma_y \exp(-\varepsilon_n) / \tilde{\eta}, \quad (2.7)$$

где  $\tilde{\eta}$  – продольная вязкость материала образца.

– податливость образца через выражение:

$$L = \frac{\varepsilon_n}{\sigma_y} + \varepsilon_n \int_0^t \tilde{\eta}^{-1} dt. \quad (2.8)$$

– значения константы скорости старения  $k_0$  при  $T = T_0, I_0 = 0$  и достаточно больших значениях времени нагружения ( $t \rightarrow \infty$ ) через выражение (2.9):

$$k_0 = \frac{\ln(\tilde{\eta}_k^0 / \tilde{\eta}_n^0)}{\tilde{\eta}_k^0 (L / \varepsilon_n - 1 / \sigma_y) - t}. \quad (2.9)$$

При этом начальное  $\tilde{\eta}_n^0$  и конечное  $\tilde{\eta}_k^0$  значения продольной вязкости определяли как котангенсы углов наклона касательных к кривым при  $t \rightarrow 0$  и при  $t \rightarrow \infty$ . Продольная вязкость  $\tilde{\eta}$  и вязкость при сдвиговом течении  $\eta$  связаны известной зависимостью  $\tilde{\eta} = 3\eta$  [52].

Путем построения графиков зависимостей  $\tilde{\eta}_k^0 = \varphi(T^{-1})$  и  $k_0 = \varphi(T^{-1})$  определяли энергию активации процесса старения  $U$  и энергию активации вязкого течения  $E$ .

Указанные константы определяются как тангенсы углов наклона аппроксимирующих прямых к оси абсцисс.

Эксплуатационные испытания проводили на натуральных деталях (крышки генераторов) в реальных производственных условиях.

Долговечность восстановленных подшипниковых узлов определяли на натуральных деталях (крышек генераторов автомобилей). Покрытия наносили из порошкообразной композиции, приготовленной по рекомендациям, приведенным в п. 3.3.

## 2.4. Планирование эксперимента и оценка достоверности результатов исследований

Математическое планирование экспериментов и обработку полученных данных выполняли с использованием программного продукта StatSoft, Inc. (2011). STATISTICA (data analysis software system), version 10 и программы Microsoft Office Excel 2013.

Применение статистических методов планирования экспериментов позволило в значительной степени исключить интуитивный подход к вопросу постановки опытов. Большинство экспериментов проводили по научно обоснованной программе, включающей объективную оценку результатов исследований. При этом осуществлялась реализация минимально возможного количества опытов без уменьшения точности результатов.

Все однофакторные эксперименты планировались в программе Microsoft Office Excel 2013, где проводился анализ полученных результатов с целью подбора уравнений регрессии, наилучшим образом описывающих изучаемую закономерность.

Подбор уравнений регрессии осуществляли по индексу корреляции и ошибки уравнения. Достоверность индекса корреляции ( $t_i$ ) сравнивали со стандартным значением критерия Стьюдента ( $t_{st}$ ). В случае, если  $t_i > t_{st}$ , индекс корреляции достоверен. Если  $t_i < t_{st}$ , индекс корреляции не достоверен, т.е. теоретическая зависимость не описывает с необходимой достоверностью результаты экспериментальных данных.

Проверка адекватности модели выполнялась при риске  $\alpha=0,05$ , для этого последовательно рассчитывали: сумму квадратов, связанную с неадекватностью модели, дисперсию неадекватности и критерия Фишера, которые сравнивали с табличным [63].

## ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 3.1. Основные положения

Посадочные места подшипниковых узлов являются одними из многочисленных соединений в агрегатах автомобильной техники. Изменение их пространственной, геометрической и размерной точности влияет на точность размерных цепей и, как следствие, на долговечность и работоспособность.

Эксплуатационные требования, предъявляемые к подшипниковым узлам автомобилей, оказывают определяющее влияние на выбор материала для покрытий и его физико-механических свойств.

Покрытия, применяемые для восстановления посадочных мест подшипниковых узлов автомобилей, должны обладать высокой адгезионной и ударной прочностью, стойкостью к агрессивным средам, низкой влагопоглощаемостью и высокой стабильностью размеров при температурных изменениях.

Данные литературы и опыт ремонтных предприятий показывают, что за период эксплуатации агрегатов и узлов автомобильной техники приходится многократно производить монтаж и демонтаж подшипниковых узлов вследствие различных причин (длительные перегрузки, техническое обслуживание, ремонт и др.).

Как говорилось выше резкое отличие вязкоупругих физико-механических и теплофизических свойств металлов и полимеров влияет на характер проявления и развития напряжений в неподвижном соединении с полимерным покрытием в нагруженном состоянии.

Существующая методика оценки работоспособности неподвижных соединений, восстановленных полимерными материалами, путем определения усилия выпрессовки подшипника, позволяет оценить только их статическую прочность без учета изменений свойств полимера под воздействием циклических нагру-

зок и внешних факторов (температура, агрессивная среда, время и пр.).

Таким образом, выбор оптимального состава ПКМ, для восстановления подшипниковых узлов должен опираться на теоретические основы процессов разрушения вязкоупругих тел под действием механических нагрузок.

Проблематика поведения материалов под действием нагрузки изучалась в течение нескольких столетий. Первые две области, контактная механика и теория вязкоупругости, давно стали классическими, а третья, механика растущих или наращиваемых тел, еще только складывается. Поэтому есть необходимость описать процесс разрушения и развития роста трещин в ремонтном полимерном материале с изменяющимися свойствами, когда на него совместно действуют постоянная и циклическая нагрузки.

## **3.2. Моделирование процессов усталостного разрушения поверхностей подшипниковых узлов автомобилей, восстановленных полимерными материалами**

### **3.2.1 Модель развития усталостных трещин в стареющих материалах**

При действии на восстановленные места подшипниковых узлов, повторяющихся или циклических напряжений, возникает усталостное разрушение, в следствии повторяющихся пластических деформаций в концевой зоне трещины [47].

Рост трещины в тонкой пластине из ремонтного полимерного материала с изменяющимися свойствами под действием знакопеременной нагрузки, показан на рис. 3.1.

$$p(t) = p_0 + \Delta p \sin \omega t, \quad (3.1)$$

где  $p_0$  – начальное значение внешней нагрузки;  $\Delta p$  – величина приложенной нагрузки;  $\omega$  – частота циклической нагрузки;  $t$  – время;  $p_0$ ,  $\Delta p$ ,  $\omega$ , не зависят от времени, а  $\Delta p < p_0$ .

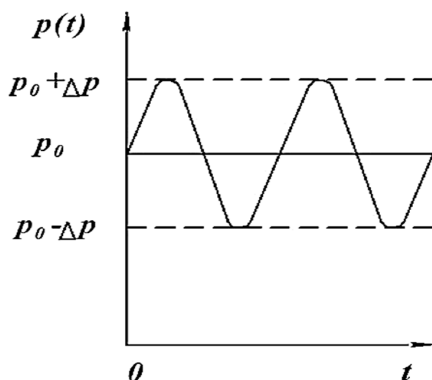


Рис. 3.1. Закон изменения циклической нагрузки

Проведенные теоретические [64] и экспериментальные [65] исследования показали, что скорость роста трещины при совместном действии усталости и ползучести, при условии, что частота циклической нагрузки  $\omega$  невелика и в процессе разрушения разогрев в конце трещины незначителен, можно записать в виде:

$$\frac{dl}{dN} = f \left[ \left( \frac{dl}{dN} \right)_y, \left( \frac{dl}{dN} \right)_n \right], \quad (3.2)$$

где  $(dl/dN)_n$  – скорость роста трещины в условиях ползучести;  $(dl/dN)_y$  – скорость роста трещины в условиях усталости;  $N$  – число циклов нагружения.

Проведённые экспериментальные исследования для ряда ремонтных полимерных материалов [66], показали, что «повреждения от усталости и ползучести в первом приближении можно рассматривать независимо друг от друга». В этом случае зависимость (3.2) можно представить так:

$$\frac{dl}{dN} = \left( \frac{dl}{dN} \right)_y + \left( \frac{dl}{dN} \right)_n, \quad (3.3)$$

В работе [64] показано, что выражение (3.3) соблюдается при различных соотношениях между слагаемыми, включая и тот случай, когда они приближённо равны друг другу.



Принимая условие, что один цикл  $N' = \omega t / 2\pi$  зависимость (3.3), примет вид:

$$\frac{dl}{dt} = \left(\frac{dl}{dt}\right)_y + \left(\frac{dl}{dt}\right)_n, \quad (3.4)$$

где  $(dl/dt)_n$  – скорость развития трещины при воздействии ползучести и изменения свойств материалов;  $(dl/dt)_y$  – скорость развития трещины при воздействии усталости.

### 3.2.2 Модель развития усталостных макроскопических трещин

Как известно, напряжение в вершине макроскопической трещины можно охарактеризовать коэффициентом интенсивности напряжений [67], который для рассматриваемого случая, при циклической нагрузке, имеет вид:

$$K_1 = k p_0 (1 + \phi_1 \sin t) \sqrt{\pi l}, \quad (3.5)$$

где  $k$  – коэффициент аппроксимации;  $t$  – мера ползучести при чистом сдвиге;  $l$  – длина трещины;  $\phi_1 = \Delta p / p_0$ .

Скорость развития трещины вследствие усталостных явлений представим в виде:

$$\left(\frac{dl}{dN}\right)_y = \frac{4\beta K_{I0}^3 \Delta K}{K_c^2 (K_c^2 - K_{I0}^3)}, \quad (3.6)$$

где  $K_c$  – коэффициент интенсивности напряжений;  $K_{I0}^3$  – среднее значение коэффициента интенсивности напряжений за цикл;  $\beta$  – постоянная, имеющая размерность длины и определяемая из эксперимента;  $\Delta K$  – изменение коэффициента интенсивности напряжений в цикле;  $\beta$  – постоянная, имеющая размерность длины и определяемая из эксперимента.

Произведя (3.6) преобразования, получим:

$$\frac{dl_y}{dt} = \varphi_1 \beta_0 k \frac{y^2}{1-y}, \quad (3.7)$$

где  $y=l/l^*$ ;  $\beta_0=4\beta/\pi l^*$ ;  $l^*$  – критическая длина трещины при  $p = p_0$ ;  $\omega$  – частота циклической нагрузки для случая расчета макроскопических трещин.

Тогда скорость развития макроскопической трещины для рассматриваемого ремонтного полимерного материала определится из уравнения вида:

$$\frac{dl_n}{dt} = lq(t), \quad (3.8)$$

где  $q(t)$  определяется из уравнения:

$$\frac{dq}{dt} = f(q,t),$$

$$f(q,t) = \frac{Q_1+Q_2+Q_3+Q_4+Q_5}{Q_6+Q_7+Q_8}, \quad (3.9)$$

где  $Q_1, Q_2 \dots Q_8$  – математические производные [66].

Разделив обе части уравнений (3.4) на  $l$  и подставив в него полученные уравнения (3.7) и (3.9) получим систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dl}{dt} = lq(t) + \varphi_1 \beta_0 k \frac{y^2}{1-y}, \\ \frac{dq}{dt} = f(q,t) \end{cases} \quad (3.10)$$

где имеет вид (3.9).

На рисунке 3.2 обозначены зависимость безразмерной длины  $y$  от времени  $t$ , полученная численным решением системы дифференциальных уравнений (3.10) методом Рунге-Кутты для макротрещины, растущей в ремонтном полимерном материале с изменяющимися свойствами, когда ядро ползучести в интегральном операторе имеет вид:

$$R_{(t,\tau)} = -\frac{\partial}{\partial \tau} \left\{ \left( C + A_c^{-\mu_1 \tau} \right) \left[ 1 - e^{-\mu_2(t-\tau)} \right] \right\} \quad (3.11)$$

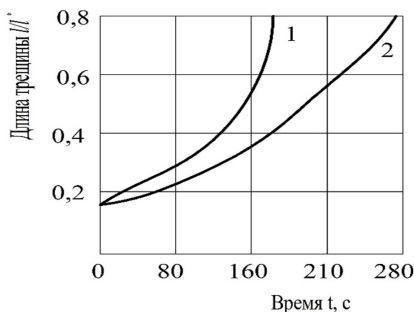


Рис. 3.2. Рост усталостной макроскопической трещины в ремонтном полимерном материале с изменяющимися свойствами. 1 – при совместном действии постоянной и циклической нагрузок; 2 – при отсутствии усталостной составляющей нагрузки

Реологические параметры ремонтного полимерного материала  $A=6,94$ ;  $C=8.64$ , , при ,  $p/k=1$ , На рисунке 3.2 кривая 2 соответствует росту трещины, когда отсутствует усталостная составляющая внешней нагрузки.

### 3.2.3 Модель развития усталостных трещин с немалой зоной предразрушения

Данный тип развития трещин провели с применением энергетических концепций [67], т.к. в данном случае использование коэффициентов интенсивности напряжений теряет смысл.

Воспользуемся уравнением, устанавливающим связь между скоростью развития усталостной трещины и нагрузкой, полученным на основе глобального энергетического критерия в предположении постоянства удельной энергии разрушения  $\gamma_*$  во время роста трещины [69]. Уравнение скорости роста усталостной трещины имеет вид:

$$\frac{d\lambda}{d\beta_1} = \frac{1}{f(\beta_1, \lambda)}, \quad (3.12)$$

где  $\lambda$  – реологическая постоянная, входящая в меру ползучести подбираемая для конкретного материала по экспериментальным кривым [66].

Принимая, что длина усталостной трещины равна  $l = l_0 + t\Delta l$ , где  $\Delta l$  – приращение длины трещины за время одного цикла,  $N' = \omega t / 2\pi$  и принимая  $\Delta l = \text{const}$ , запишем (3.12) в виде:

$$\frac{d\lambda}{dN} = \int_{\beta_{\min}}^{\beta_{\max}} \frac{d\beta_1}{f(\beta_1, \lambda)} \quad (3.13)$$

Представив действующую нагрузку в виде:

$$\beta_1 = \frac{\pi p_0}{2\sigma_\tau} (1 + \varphi_1 \sin \omega t), \quad (3.14)$$

где по-прежнему  $\Delta p \leq p_0$ .

Тогда:

$$\beta_{\max} = \beta_0 (1 + \varphi_1), \beta_{\min} = \beta_0 (1 - \varphi_1) \quad (3.15)$$

Сделав замену переменной в (3.13) вида:

$$y = \frac{l}{l^*}, \quad \lambda = \frac{y}{(2 \ln \sec \beta_{01})}, \quad \beta_{01} = \frac{\pi p_0}{2\sigma_\tau}, \quad (3.16)$$

после преобразований получили:

$$\frac{d\beta_1}{dy} = f_1(\beta_1, y), \quad (3.17)$$

$$\text{где } f_1(\beta_1, y) = \frac{2 \ln \sec \beta_1 - 2y(\ln \cos \beta_1 + \beta_1 \operatorname{tg} \beta_1)}{y^2 (\beta_1 \sec^2 \beta_1 - \operatorname{tg} \beta_1)}.$$

Поскольку  $N' = \frac{\omega t}{2\pi}$ , то (3.15) с учетом (3.17) приняло вид:

$$\left( \frac{dy}{dt} \right)_y = \frac{\omega}{2\beta\pi} \int_{\beta_0(1-\varphi_1)}^{\beta_0(1+\varphi_1)} \frac{d\beta_1}{f_1(\beta_1, y)}. \quad (3.18)$$

Скорость развития трещины, имеющей немалую зону предразрушения и растущую в условиях ползучести в стареющем ремонтном полимерном материале под действием нагрузки  $p(t) = p_0 + \Delta p \sin \omega t$ , в случае вязкоупругого аналога задачи Гриффита нашли из уравнения:

$$\left(\frac{dl}{dt}\right)_n = lw(t), \quad (3.19)$$

где  $w(t)$  определили из уравнения типа  $\dot{p} = \frac{Q_4}{Q_3}$ ,  $\dot{w}(t) = f_2(w, t)$ , из этого следует, что:

$$f_2(w, t) = \frac{Q_4}{Q_3}, \quad (3.20)$$

$$\text{где: } Q_4 = \frac{\omega}{\psi(\alpha_1)} + Q_1 - \frac{A \exp(-\mu_1 t)}{\omega} \int_0^1 [\mu_1 Q_{12} + (\mu_2 - \mu_1) G_3] \varphi(s) ds$$

$$Q_3 = Q_2 - \frac{\mu_2 m C}{\omega^3} \int_0^1 G_2 s \varphi(s) ds - Q_5, \quad Q_2 = \frac{1}{p^2} Q_1,$$

$$Q_5 = \frac{A \exp(-\mu_1 t)}{\omega^3} \left[ \mu_1^2 \int_0^1 Q_1 s \varphi(s) ds + (\mu_2 - \mu_1) \int_0^1 Q_3 s \varphi(s) ds \right],$$

$$Q_1 = \int_0^1 [\mu_2 C G_2 A \exp(-\mu_1 t) (\mu_1 G_{12} + (\mu_2 - \mu_1) G_3)] \varphi(s) ds$$

$$G_1 = \exp\left(\frac{-\mu_1 ms}{\omega}\right), \quad G_2 = \exp\left(\frac{-\mu_2 ms}{\omega}\right), \quad G_3 = \exp\left(\frac{(\mu_1 - \mu_2) ms}{\omega}\right),$$

$$\alpha_1 = \frac{\pi p_0}{2\sigma_T} (1 + \varphi_1 \sin \varpi t), \quad \psi(\alpha_1) = \frac{m^2}{\ln \sec \alpha_1}, \quad m = 1 - \cos \alpha_1.$$

Таким образом, рост усталостной трещины с немалой зоной предразрушения в ремонтном полимерном материале с изменяющимися свойствами опишем следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = y\omega(t) + \frac{\varpi}{2\pi} \int_{\beta_0(1-\varphi_1)}^{\beta_0(1+\varphi_1)} \frac{1}{f_1(\beta, y)} d\beta, \\ \frac{d\omega}{dt} = f_2(\omega, t), \end{cases} \quad (3.21)$$

где  $f_1(\beta_1, y)$  – (3.17), а  $f_2(\omega, t)$  – (3.18).

В рамках предложенного подхода рассмотрели некоторые вопросы развития данного типа усталостных трещин в ремонтном

полимерном материале с изменяющимися свойствами [70]. Деформирование материала описывается интегральными операторами вида:  $\sigma_B(\tau) = \sigma_B(0)(a - be^{-\tau})$  с ядром ползучести вида (3.11). На рис. 3.3 приведена зависимость безразмерной длины  $u$  от времени  $t$ , полученная численным решением системы (3.21) для материала с реологическими параметрами  $A=6,94$ ,  $C=8,64$ ,  $\mu_1 = 0,014$  1/сут.,  $\mu_2 = 0,1$  1/сут., при  $l_0/l^* = 0,3$ ,  $\omega = 1$  Гц,  $\omega_1 = 0,07$  (кривая 1),  $\omega_1 = 0,03$  (кривая 2),  $\beta_0 = 0,7$ . На рис. 3.4 показан рост трещин в теле с теми же реологическими параметрами в зависимости от того, присутствует усталостная составляющая или отсутствует усталостная составляющая во внешней нагрузке,  $\omega_1 = 0,03$ ,  $l_0/l^* = 0,3$ ,  $\omega = 1$  Гц.

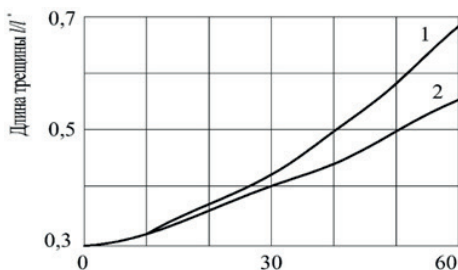


Рис. 3.3. Рост усталостной трещины с немалой зоной предразрушения ( $d < l$ ) в вязкоупругом материале с изменяющимися свойствами в зависимости от отношения  $\Phi_1 = \Delta p / p_0$ : 1 –  $\phi_1 = 0,07$ ; 2 –  $\phi_1 = 0,03$

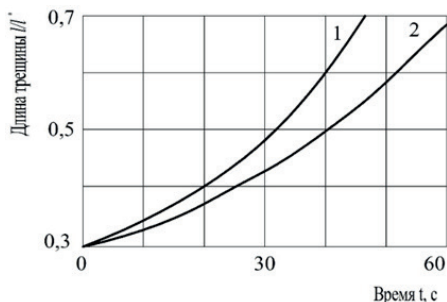


Рис. 3.4. Рост усталостной трещины с немалой зоной предразрушения ( $d < l$ ) в вязкоупругом материале с изменяющимися свойствами в зависимости от вида приложенных нагрузок: 1 – при совместном действии постоянной и циклической нагрузок; 2 – при отсутствии усталостной составляющей нагрузки

На основании полученной системы уравнений (3.21) можно оценить влияние реологических параметров на развитие трещин в ремонтном полимерном материале с изменяющимися свойствами.

### **3.3. Исследование адгезионной составляющей прочности полимерных материалов при формировании покрытий**

#### **3.3.1 Теоретические предпосылки к исследованию влияния ультразвуковых полей на адгезионную прочность полимерных покрытий**

В процессе эксплуатации полимерные композиционные материалы в восстановленных посадочных местах подшипниковых узлов испытывают статические и динамические нагрузки, температурные перепады, воздействие агрессивной среды и т.д. [71]. При воздействии указанных факторов в ряде случаев происходит отслоение покрытий из ПКМ от подложки, что в дальнейшем ведет к постепенному разрушению и недопустимому увеличению зазора в соединении подшипниковых узлов.

Прочность сцепления (адгезионная прочность) является в большинстве случаев фактором, определяющим работоспособность восстановленной детали [72].

Адгезия – явление, заключающееся в возникновении физического и/или химического взаимодействия между конденсированными фазами при их молекулярном контакте, приводящее к образованию новой гетерогенной системы [73, 74]. Это взаимодействие определяется количеством и качеством адгезионных связей, возникающих на границе раздела фаз.

В настоящее время нет единой трактовки природы адгезионных связей. Существуют многочисленные теории, по-разному объясняющие природу адгезии.

Первая гипотеза о природе адгезии заключается в механическом заклинивании адгезива в порах и микронеровностях подложки. Однако очевидно, что ограниченность учета ряда других факторов, оказывающих значительное влияние на взаимодей-

стве соединяемых материалов, делает эту гипотезу несостоятельной.

Современные теории природы адгезии рассматривают связь полимера с металлической подложкой как результат специфического атомно-молекулярного взаимодействия. В этих теориях механическое взаимодействие рассматривается как возможное, но не определяющее [75].

Наибольшую известность получили следующие теории специфического взаимодействия покрытия с подложкой: молекулярно-адсорбционная, электрическая, электронная, диффузионная и микрорелогическая.

Первые представления об адсорбционном взаимодействии принадлежат Г. Бехгольту, С. Нейману и М. Бакрофту. Работы этих учёных получили дальнейшее развитие в исследованиях Н.А. Дебройна и А.Д. Мак-Ларена. Большой вклад в разработку и обоснование основных положений молекулярной теории внесли исследования А.А. Берлина и В.Е. Басина [72, 76, 77].

Согласно адсорбционно-молекулярной теории основной причиной адгезии являются межфазные молекулярные силы. Это, в первую очередь, силы Ван-дер-ваальса, ориентационные, дисперсионные, индукционные и др. Адсорбционное взаимодействие может быть достигнуто двумя путями: повышением полярности субстрата за счет его химической модификации активными функциональными группами или модифицированием самого полимера. Однако эта теория не объясняет высокую адгезионную прочность неполярных адгезивов к полярным субстратам.

Электрическая и электронная теории адгезионного взаимодействия основываются на исследованиях Б.В. Дерягина, Н.А. Кротова и В.П. Смилга. Несмотря на серьёзное теоретическое обоснование адгезионного взаимодействия до сих пор полностью не объяснены причины сохранения адгезионной прочности при электризации и облучении покрытий пучком ускоренных электронов, не объяснены различные значения адгезионной прочности при нанесении покрытий на подложки из разных металлов [72]. Также не доказано, что заряженные поверхности (подложка и покрытие) до разрушения идентичны с поверхностями после разрушения [76].



Некоторые теории определяют величину адгезионной прочности числом и природой связи покрытия и подложки. Согласно диффузионной теории, адгезия, как и аутогезия, происходит за счет диффузии концов или сегментов макромолекул полимера через границу первоначального контакта. Очевидно, эта теория более приемлема для соединений из однородных материалов, ибо трудно допустить существенное значение диффузии макромолекул и сегментов при контакте полимера с металлом и других неактивных в диффузионном отношении подложках [77].

Более комплексно природу адгезии объясняет микрореологическая теория, согласно которой величина адгезии зависит от площади фактического контакта адгезива с подложкой, а значит и от числа связей, приходящихся на эту площадь. Эта теория представляет работу адгезии ( $W_A$ ), как составляющую энергий адгезионных связей ( $\Sigma$ ) и числа связей ( $n_i$ ) в расчете на единицу площади адгезива:

$$W_A = S_{\phi} \Sigma n_i U_i = \gamma_n \cos \theta + \gamma_m - \gamma_{mn}, \quad (3.22)$$

где  $\gamma_n$  – поверхностная энергия на границе «полимер – воздух», кДж/м<sup>2</sup>;  $\gamma_m$  – поверхностная энергия на границе «субстрат – воздух», кДж/м<sup>2</sup>;  $\gamma_{mn}$  – поверхностная энергия на границе «субстрат – полимер», кДж/м<sup>2</sup>;  $\theta$  – угол смачивания (рис 3.5)

Из формулы видно, что адгезионную прочность можно повысить за счет увеличения плотности адгезионных связей, путем применения различных внешних воздействий (термодинамического или силового) на процесс формирования покрытия, а также за счет увеличения площади фактического контакта полимера с основой.

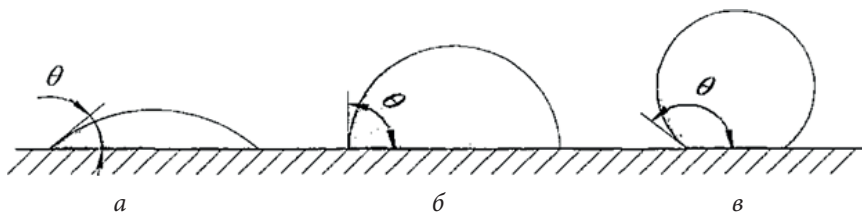


Рис. 3.5. Профили капли при ограниченном смачивании:  
 а –  $\theta < 90^\circ$ ; б –  $\theta = 90^\circ$ ; в –  $\theta > 90^\circ$

Одним из наиболее эффективных силовых воздействий является воздействие на процесс формирования покрытия вибрация-ми различных частот вплоть до ультразвукового диапазона.

Для покрытий, полученных в условиях силового воздействия на полимер через деталь, фактическую площадь контакта можно определить с помощью уравнения:

$$S = 2n_1 \frac{h_{\text{ср}}}{\cos \alpha} + \left[ \left( 2n_1 \frac{h_{\text{ср}}}{\cos \alpha} n_2 \pi^2 d^2 \sqrt{\frac{P \cdot t}{\eta}} \right) \right], \quad (3.23)$$

где  $n_1$  – число микронеровностей на единицу поверхности подложки;  $h_{\text{ср}}$  – среднее значение высоты треугольника, равное глубине проникновения полимера;  $\alpha$  – половина угла условного треугольника сечения неровностей покрываемой поверхности;  $n_2$  – число пор на 1 см<sup>2</sup> поверхности микронеровностей;  $d$  – диаметр пор;  $P, t, \eta$  – давление и вязкость полимера, время контакта.

При формировании покрытий в свободном состоянии происходит самопроизвольное растекание полимера, поэтому обязательным условием образования адгезионного соединения является смачиваемость поверхности подложки [75]. Чем больше поверхностное натяжение на границе твердой фазы с воздушной, тем больше площадь, смачиваемая жидкой фазой. Эту площадь также можно увеличить, если уменьшить поверхностную энергию жидкой фазы, которая отражается законом сохранения энергии при адгезии гетерогенных систем (закон Дюпре), исходя из которого на работу адгезии, наряду с равновесной поверхностной энергией, оказывает влияние и краевой угол смачивания. Кроме этого, на смачиваемость влияют факторы многокомпонентности адгезива, шероховатость подложки, присутствие загрязнений, ПАВ и др.

Работа адгезии также зависит от динамики образования адгезионного соединения. Чем быстрее происходит смачивание, тем быстрее и лучше заполняются микронеровности подложки, чего можно добиться воздействием УЗП.

При постоянных значениях шероховатости и показателей специфических свойств контактирующих тел адгезионную прочность и скорость заполнения микронеровностей можно увели-

читать за счет изменения краевого угла смачивания, поверхностной энергии и параметров УЗП.

Качество адгезионных металлополимерных покрытий определяется, наряду с природой и составом адгезива и субстрата, равномерностью распределения компонентов в объеме материала, условиями термоокисления и релаксации, характером распределения сил взаимодействия и, в конечном счете, фактической площадью контакта полимера с подложкой. В основу этих условий положен процесс массообмена между субстратом и адгезивом. Управлять этими условиями можно путем усовершенствования технологии нанесения и формирования покрытий [78].

Поэтому возникла необходимость изучить вопросы смачивания подложки расплавом полимеров для условий получения покрытий камерным способом с силовым воздействием на процесс формирования адгезионного соединения.

Если покрываемую поверхность рассмотреть, как поликапиллярную систему, то глубину затекания жидкости в порах подложки можно определить по формуле капиллярного давления:

$$h = \frac{k\gamma l \cos \theta}{rg\rho}, \quad (3.24)$$

где  $k$  – постоянная;  $\gamma$  – равновесное поверхностное натяжение,  $\theta$  – равновесный краевой угол смачивания;  $\rho$  – плотность жидкой фазы;  $r$  – радиус капилляра (поры);  $g$  – ускорение силы тяжести.

Если капилляр имеет форму узкой щели с постоянной толщиной  $\delta$ , то глубина затекания жидкости в капилляре определяют по формуле:

$$h = \frac{k\gamma l \cos \theta}{\delta g\rho}, \quad (3.25)$$

Подставляя в известное уравнение веса столба жидкости  $P_g = h\rho g$  уравнение (3.24) капиллярное давление равняется:

$$P_k = \frac{k\gamma l \cos \theta}{r}, \quad (3.26)$$

Из уравнения (3.26) видно, что капиллярное давление находится в прямой зависимости от смачиваемости.

В условиях ультразвукового воздействия капиллярное давление равняется:

$$P_k = P_g + \Delta P, \quad (3.27)$$

где  $\Delta P$  – рациональное давление в порах.

По экспериментальным данным определяется по формуле:

$$\Delta P = \frac{\rho v_m^2}{4}, \quad (3.28)$$

где  $\rho$  – плотность расплава;  $v_m$  – амплитуда колебательной скорости УЗП.

Преобразовав уравнение (3.27) с учетом (3.24) и (3.28) и подставляя их в (3.23), получим уравнение адгезионной прочности:

$$AP = 2A_g n_1 \frac{h_{\text{иср}}}{\cos \alpha} + (1 + n_2 \pi^2 d^2) \sqrt{\frac{t}{r\eta} \left( \frac{k\gamma l \cos \theta}{r} - \frac{\rho v_m^2}{4} \right)}, \quad (3.29)$$

где  $A_g$  – специфическая адгезия, определяемая природой контактирующих тел.

Для условий формирования покрытий из расплавов полимеров важным фактором, оказывающим влияние на адгезионную прочность, является глубина затекания расплава в микронеровностях.

В свою очередь, при формировании покрытий из расплавов полимеров глубина затекания определяется скоростью заполнения неровностей и микропор.

Время подъема расплава в капилляре на высоту ( $h$ ) можно определить из гидродинамического расчета [79] по формуле:

$$\tau = \frac{8\eta}{(\eta_2 - \eta_1) r^2 g} \left[ \frac{2\gamma \cos \theta}{(\rho_2 - \rho_1) g^r} \ln \frac{\frac{2\gamma \cos \theta}{(\rho_2 - \rho_1) rg}}{\frac{2\gamma \cos \theta}{(\rho_2 - \rho_1) rg} - h} - h \right] \quad (3.30)$$

Из соотношения (3.30) видно, что предельная высота поднятия расплава в капилляре может быть достигнута через бесконечно большое время. В практических расчетах значение высоты под-

нятия расплава фиксируют на определенном уровне. Тогда, если в качестве движущей силы принять разницу между капиллярным давлением и давлением столба жидкости с учетом дополнительных сил внешнего воздействия, скорость заполнения микронеровностей можно определить по формуле:

$$\frac{d\tau}{dh} = \frac{8\eta}{\rho r^2 g} \left[ \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho r g} \cdot \frac{1}{\frac{2\gamma \cos \theta}{\rho r g} - 1} - 1 \right] = \frac{8\eta}{\rho r^2 g} \left( \frac{2\gamma \cos \theta}{2\gamma \cos \theta - h \rho r g} - 1 \right) = \frac{8\eta}{\rho r^2 g} \cdot \frac{h \rho r g}{2\gamma \cos \theta - h \rho r g} = \frac{8\eta}{r} \cdot \frac{h}{2\gamma \cos \theta - h \rho r g} \Rightarrow \frac{dh}{d\tau} = \frac{r}{8\eta} \left( \frac{2\gamma \cos \theta - h \rho r g}{h} \right) = \frac{r^2}{8\eta h} \left( \frac{2\gamma \cos \theta}{r} - h \rho g \right) \quad (3.31)$$

Пренебрегая силой тяжести, получим уравнение:

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{2\gamma \cos \theta r}{8\eta h} \quad (3.32)$$

Из уравнения (3.29) и (3.32) следует, что даже при постоянной шероховатости и адгезионную прочность и скорость заполнения микронеровностей можно увеличить за счет изменения краевого угла смачивания, поверхностной энергии и параметров УЗП.

Таким образом, представляет интерес исследовать изменения адгезионной прочности от указанных факторов.

Наибольший эффект ультразвуковые колебания оказывают при воздействии непосредственно во время нанесения покрытия. При этом зону ультразвукового воздействия необходимо приблизить как можно ближе к разделу двух сред, так как распространение акустических колебаний в среде сопровождается поглощением энергии вибрации [80].

Значительное влияние на эффект воздействия УЗК оказывает схема и момент подачи колебаний [81]. При этом следует учитывать свойства УЗК очищать покрываемую поверхность от загрязнений, а также способность среды поглощать энергию. Так, при распространении волн в полимерных материалах происходит уменьшение интенсивности волны, которое описывается уравнением [82].

$$I_k = I_0 \cdot I^{-2\alpha x}, \quad (3.33)$$

где  $I_0$  – интенсивность в начальной точке,  $\alpha$  – коэффициент затухания.

Качество адгезионных металлополимерных систем определяется, наряду с природой и составом адгезива и субстрата, равномерностью распределения компонентов в объеме покрытия, условиями термоокисления и релаксации, характером распределения сил взаимодействия и в конечном итоге фактической площадью контакта полимера с подложкой [51]. В основу этих условий положен процесс массообмена между субстратом и адгезивом. Управлять этими условиями можно путем усовершенствования технологии нанесения и формирования покрытий.

Теоретические предпосылки показали, что перспективным направлением совершенствования технологии получения полимерных покрытий является воздействие на процесс формирования адгезионного контакта УЗК, но не выяснены вопросы, связанные с механизмом образования адгезионного контакта между покрытиями, сформированными из порошкообразных композиций в совмещённом электростатическом и ультразвуковом поле. Это не дает возможности обосновать технологические режимы формирования покрытий, в связи с чем ставили первоочередную задачу изучить следующие вопросы:

- 1) влияние УЗП на смачиваемость подложки расплавом полимера;
- 2) влияние технологических режимов формирования покрытий и параметров УЗП на адгезионную прочность;
- 3) изменение адгезионной прочности полимерных покрытий в зависимости от материала и шероховатости подложки.

### **3.3.2 Порядок проведения исследований**

Исследования проводили в три этапа. На первом этапе исследовали влияние условий формирования покрытий на динамику растекания расплавленного полимера.

Критерием оценки динамики растекания капли расплавленного полимера являлась величина  $\frac{d\lambda}{dt}$ . В качестве  $\lambda$ , приняли относительный прирост площади капли  $\lambda = \frac{S_i \cdot S_0}{S_0}$ , где  $S_i$  – площадь капли в  $i$ -ом моменте воздействия УЗК;  $S_0$  – площадь капли в начале воздействия УЗК;  $t$  – продолжительность от начала воздействия УЗК до момента  $i$ -го измерения площади капли.

Площадь определяли анализом данных микросъемки.

На втором этапе исследований изучали влияние схемы воздействия УЗК и технологических режимов формирования покрытий на адгезионную прочность соединений. Для этого исследовали 12 схем подачи УЗК по фазам формирования покрытий (рис. 3.6). Эффективность воздействия оценивали по значению адгезионной прочности соединения.

Адгезионную прочность определяли методом штифтов (см. п. 2.2). Покрытия наносили на подложках из АЛ4, обработанных на токарном станке с шероховатостью  $Rz = (20 \pm 10)$  мкм. Температура формирования (190–250) °С и продолжительность формирования (15 ± 7) мин.

Изучение влияния технологических режимов формирования покрытий на адгезионную прочность проводили для соединений, сформированных по схеме, обеспечивающей наилучшие условия формирования адгезионного контакта [83].

Известно, что наибольшее влияние на качество покрытий оказывают температурно-временные условия формирования покрытия, частота и интенсивность УЗК [84]. Эти факторы оказывают влияние на процесс формирования покрытия в совокупности и в той или иной степени находятся в зависимости друг от друга.

При недогреве подложки и незначительной продолжительности формирования расплавленный полимер быстро твердеет и не успевает заполнить все неровности подложки. Это приводит к тому, что соединяемые разнородные фазы не успевают достаточно близко приблизиться для образования надежного адгезионного контакта, а силы взаимодействия между ними не проявляются в полной мере.

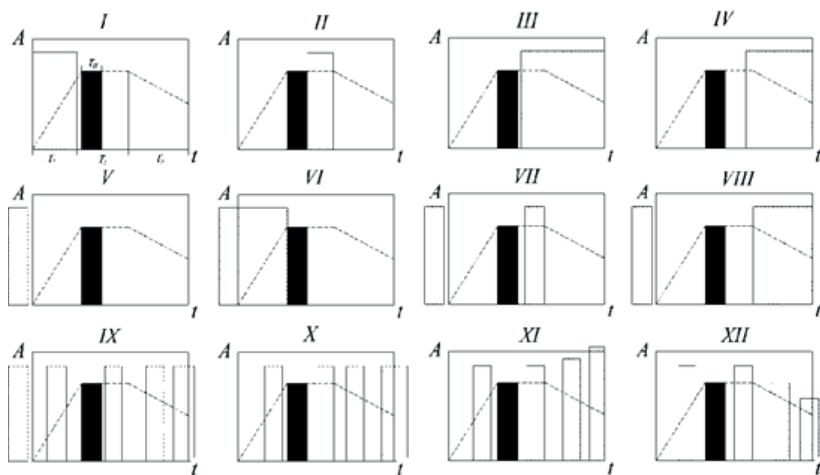


Рис. 3.6. Схемы воздействия УЗК по фазам формирования покрытий:

$\tau_1$  – нагрев подложки;  $\tau_2$  – выдержка при постоянной температуре;  $\tau_3$  – охлаждение покрытой детали;  $\tau_n$  – нанесение порошка на деталь;  $A$  – амплитуда УЗК;  $t$  – продолжительность воздействия УЗК; – область воздействия УЗК

Перегрев полимера приводит к интенсификации термоокислительной деструкции макромолекул. Указанное явление затрудняет процесс формирования адгезионных связей между адгезивом и подложкой, а при определённых условиях способствует разрушению ранее образованных связей [85].

Для выявления оптимальных технологических режимов проводили планирование экспериментов с целью построения математической модели зависимости адгезионной прочности покрытий  $y_1 \dots y_3$  от температуры ( $x_1$ ) и продолжительности формирования покрытий ( $x_2$ ), частоты ( $x_3$ ) и амплитуды ( $x_4$ ) ультразвука. Решение о выборе модели принимали экспертным путем для минимизации количества проводимых экспериментов. Учитывая изложенное, исследования проводили с применением 3 ( $k \cdot P$ ) эксперимента, варьировали 4 фактора на трех уровнях каждый, после чего проводили эксперимент и осуществляли его статистическую обработку. Всего было проведено 27 опытов в различных точках факторного пространства.



Матрица планирования и расчета модели приведена в прил. А. Обработку экспериментов проводили при помощи программного продукта StatSoft, Inc. (2011). STATISTICA (data analysis software system), version 10 и программы Microsoft Office Excel 2013 [86].

На третьем этапе изучали зависимость адгезионной прочности покрытий от материала (сталь, алюминиевый сплав) и состояния (шероховатость, вид модификаций) подложки.

Модификацию осуществляли фосфатированием образцов из алюминиевых сплавов цинкофосфатным раствором КФ-2, а из стали железофосфатным концентратом КФА-1.

Исследования проводили по однофакторной схеме. Полученные результаты обрабатывали и сравнивали с данными покрытий, полученных при идентичных условиях без воздействия на подложку УЗК.

### **3.3.3 Результаты исследований**

В теоретических предпосылках (п/п. 3.3.1), технологические условия формирования покрытий должны обеспечить получение максимальной площади контакта полимера с подложкой за счет лучшего затекания расплавленного полимера в микронеровностях и порах подложки, а также за счет интенсивного удаления газовых включений из зоны границы адгезионного контакта.

Процесс формирования ремонтного полимерного покрытия можно условно разделить на три стадии. На первой стадии происходит сближение молекул расплавленного полимера к поверхности, подложки с одновременным их ориентированием в самом покрытии так и на границе раздела фаз.

На второй стадии происходит непосредственное взаимодействие между отвердевающим полимером и подложкой. Интенсивность их взаимодействия определяется расстоянием между соединяемыми фазами. В реальных условиях это расстояние зависит от многих факторов. К ним следует отнести наличие загрязнений на покрываемой поверхности, газовых включений в микропорах и микротрещинах, воздушной микропенки на границе раздела фаз.

На третьей стадии происходит образование химических связей между полимером и подложкой и формирование структуры покрытия.

Таким образом, технологические режимы формирования покрытий должны обеспечить максимальное сближение фаз на первой стадии формирования покрытия, то есть должны обеспечить наилучшую смачиваемость подложки полимером. На второй стадии образования адгезионного контакта следует учитывать, что чрезмерный нагрев детали способствует образованию газовых включений в результате термоокислительной деструкции, что ухудшает качество адгезионного соединения. И в конечном счете, технологические режимы должны обеспечить оптимальные условия структурообразования покрытия.

Исследования показали, что ультразвуковое воздействие на подложку способствует лучшему растеканию расплавов полимеров. Так, анализ роста капли расплава полимера от продолжительности экспозиции при определенной температуре показал, что относительный прирост площади капли, сформированной в УЗП, в 2,6...3,2 раза выше, чем капли, сформированной без воздействия УЗП (рис. 3.7) [86].

Капля, сформированная в УЗП, достигает максимального прироста площади контакта полимера с подложкой после экспозиции при постоянной температуре в течение 8 с, а капля, сформированная без воздействия УЗП, после 10 с.

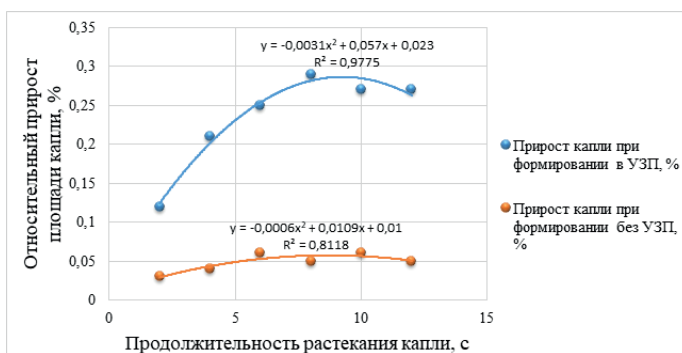


Рис. 3.7. Динамика растекания капли расплава полимера при температуре формирования капли  $(180 \pm 3)^\circ\text{C}$

На рис. 3.8 показаны капли в начальный период их образования (а, б) и после их формирования (в, г). Капля, расположенная на левом образце, формировалась без УЗП, а на правом – с воздействием УЗП (большая начальная площадь капли, показанной на позиции (а) по сравнению с (б) объясняется полидисперсностью твердых частиц, из которых формировали капли, т.е. начальный объем первой капли был больше, чем у второй).

Изучение геометрии сформированных капель в осевом сечении перпендикулярном к подложке (рис. 3.9), показало, что обе капли имеют форму шарового сегмента, но с различными краевыми углами  $\theta$ . Так, угол  $\theta$  у капли, сформированной в УЗП, на 20...28 % меньше, чем у капли, сформированной без УЗП.

Учитывая, что капли формировались при всех остальных одинаковых условиях, можно заключить, что ультразвуковое воздействие оказывает влияние на смачиваемость твердых материалов расплавами полимеров из предложенной нами композиции, что согласуется с выдвинутыми в п/п. 3.3.1 теоретическим предположениями.

Ускорение процесса растекания полимера в УЗП, вероятно, вызвано очисткой поверхности подложки в результате кавитационного разрушения адсорбционных пленок, препятствующих смачиванию, а также интенсификацией движения молекул расплава под действием радиационного давления ультразвука.

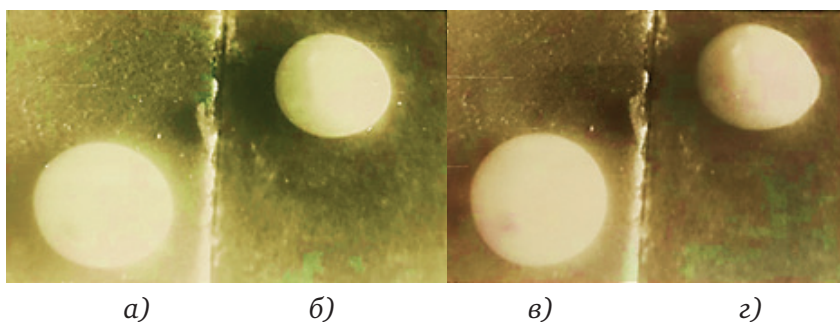


Рис. 3.8. Растекаемость капли из расплавов полимеров: а, б – в начальный период растекания; в, г – в конце формирования капли; а, в – без УЗП; б, г – в УЗП

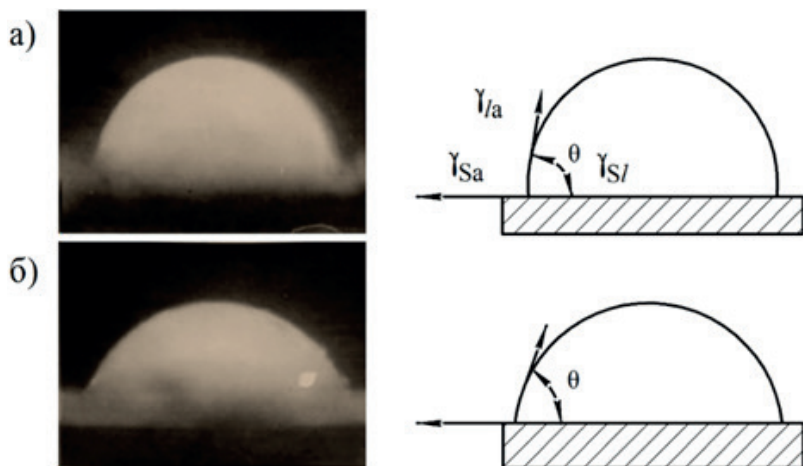


Рис. 3.9. Профиль капли расплава полимера, сформированной в обычных условиях (а) и в УЗП (б):  $\gamma_{sa}$  - равновесное поверхностное натяжение на границе твердой фазы с воздушной,  $\gamma_{sl}$  - равновесное поверхностное натяжение на границе твердой фазы с жидкой,  $\gamma_{la}$  - равновесное поверхностное натяжение на границе жидкой фазы и воздушной,  $\theta$  - краевой угол смачивания

Как говорилось выше, технологические условия формирования покрытий оказывают влияние на адгезионную прочность в совокупности и являются главными факторами, определяющими полноту адгезионного контакта покрытия с подложкой.

Анализ результатов влияния условий воздействия УЗК на адгезионную прочность (рис. 3.6) показал, что лучшие условия формирования адгезионного контакта достигаются при озвучивании подложки по схемам II, IX, X и XII (рис. 3.10). Характерным для всех этих схем является воздействие УЗП после нанесения порошкообразной композиции в начальный период оплавления порошка. Это, вероятно, способствует увеличению фактической площади контакта адгезива с подложкой за счет более полного заполнения микронеровностей и пор подложки расплавленным полимером, лучшей диффузии сегментов макромолекул в кристаллическую решетку металла, интенсификации удаления газовых включений из зоны контакта полимера с подложкой в начальный период формирования покрытия.

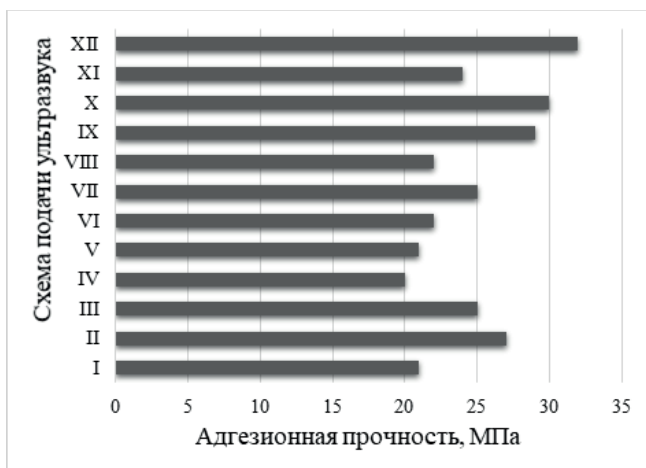


Рис. 3.10. Зависимость адгезионной прочности покрытий от схемы подачи УЗК: температура формирования ( $210 \pm 10$ ) °С; продолжительность формирования ( $15 \pm 7$ ) мин; материал подложки АЛ4

Как видно из рис. 3.10 адгезионная прочность повышается (до 29 МПа) при воздействии ультразвуком на подложку до нанесения порошкообразной композиции и во время формирования покрытия (схемы IX и X), это, по-видимому, связано со способностью ультразвука очищать поверхность и тем самым улучшать смачиваемость подложки расплавом полимера, что согласуется с результатами проведенных исследований.

Максимальная адгезионная прочность (32 МПа) достигается при воздействии ультразвуком по XII схеме. Формирование покрытий по этой схеме сопровождается воздействием УЗК на подложку с частотой 20 кГц и амплитудой 10 мин с последующим уменьшением амплитуды по зависимости, близкой к экспоненциальной. При этом УЗК подаются в импульсном режиме, что обеспечивает получение структуры с высокой степенью кристалличности и равномерным распределением составляющих композиции в объеме покрытия. Таким образом, подтверждается предположение о необходимости снижения интенсивности УЗК по экспоненциальной зависимости. Это устраняет возможность появления эффек-

тов резонанса [87], а значит обеспечивает устойчивость условий структурообразования.

Представленная в таблице (прил. А) матрица планирования эксперимента для независимых друг от друга факторов была реализована после получения результатов предварительных опытов, описанных и представленных на рисунках 3.6 и 3.9. Полученные при этом полиномы II степени дали возможность предположить, что адекватность выявленной при планировании эксперимента модели будет достаточной, что и было проверено после статистической обработки результатов эксперимента по методике, изложенной в работе [88].

Сравнивали дисперсии полученных откликов и по критерию Фишера проверяли их принадлежность к генеральной совокупности. Максимальная дисперсия наблюдалась для  $\sigma_{y1} = 65,84$  МПа, а для  $y_3$  – минимальная 60,4 МПа. Тогда отношение большей к меньшей дисперсии дает расчетное значение критерия Фишера  $F_p = 65,84/60,4 = 1,09$ , что меньше табличного значения критерия для уровня доверительной вероятности 95 %  $F_T(0,05) = 2,728$ . В то время, как р-уровень значимости, определяемый при помощи встроенной функции ФРАСП в Microsoft Excel, равен 0,41, что более уровня значимости 0,05, следовательно, сделали вывод о равенстве дисперсий. Встроенные функции указанного программного обеспечения позволили наряду с программой Statistica 10.0 проверить не только значимость каждого полученного коэффициента уравнения регрессии по критерию Стьюдента, но и адекватность полученной модели через расчет дисперсии адекватности и повторного сравнения критерия Фишера с табличными значениями:

$$F_p \leq F_T \quad (3.34)$$

где  $F_p$  – расчетное значение критерия Фишера;  $F_T(p=0,05; f_1=20; f_2=26) = 1,99$ ;  $f_1$  – число степеней свободы числителя,  $f_2$  – знаменателя.

Но при этом уже по условию 1 проверяли гипотезу об адекватности полученной модели:

$$F_p = \frac{S_{\text{адек}}^2}{S_y^2} = \frac{50,12}{60} = 0,8429 \leq F_T(0,05; 20; 26) = 1,99$$

Далее посредством программного модуля Statistica 10.0 (далее ПМ Статистика) путем преобразования Бокса-Кокса получили параметры, необходимые для расчета критериев согласия Пирсона и Колмогорова. Результаты преобразования представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

**Результаты преобразования Бокса-Кокса в Statistica для расчета критериев согласия, полученные в ПМ Statistica**

	Преобразование Б-К зависимой переменной: Адгезионная прочность, МПа 4 3-х уровневые ф; 1 Блоки; Остаточ. SS=8,342449 ЗП Адгезионная прочность. Мпа			
	Лямбда	SSE(I)	Chi <sup>2</sup> (1)	P
Статистики	-0,220619	79,95718	6,068850	0,013764

Близость спрогнозированных моделью зависимостей к полученным в лаборатории результатам измерений адгезионной прочности была оценена при помощи критериев согласия [89]:

- Пирсона (критерий Хи-квадрат) получен при помощи ПМ Статистика (см. табл. 3.1)  $\chi^2=6,07$ , что меньше табличного значения  $P(6;3)=111$ , следовательно, по критерию согласия Пирсона теоретический закон распределения, предсказанный математической моделью, близок к фактическому.

- Колмогорова ( $p[\lambda=0,22] = 0,485$ ), что приблизительно равно 0,5 и равно верхней границе критерия. По результатам этой проверки был также сделан вывод о случайности расхождения между теоретическими и опытными результатами.

По данным испытаний, получены уравнения регрессии зависимости адгезионной прочности от варьируемых входных параметров в кодированных значениях переменных:

$$\begin{aligned} \text{АП} = & 22,104 - 1,9x_1 + 4,771x_2 - 0,143x_3 + 0,561x_4 - \\ & - 1,9x_1^2 + 1,67x_2^2 + 1,67x_3^2 + 1,57x_4^2 - 2,32x_1x_2 \end{aligned} \quad (3.35)$$

Другие парные взаимодействия уравнения регрессии отсеяны по критерию Стьюдента, как малозначимые, поскольку дисперсия парных взаимодействий по результатам расчетов составила:

$$s_{b_{ij}} = \frac{s_y^0}{n \cdot \sum_{i,j=1}^n (x_i \cdot x_j)^2} = \frac{55,4}{4 \cdot 16} = 0,866, \quad (3.36)$$

где дисперсия воспроизводимости в центре плана

$$s_y^0 = \frac{\sum_{i=1}^k (y_i - \bar{y})^2}{k} = 55,4; \quad - \text{величина среднего значения отклика по}$$

всем центральным точкам плана;  $k$  – количество центральных точек плана;  $n$  – количество факторов в математической модели.

Следовательно, условие значимости коэффициентов при парных взаимодействиях не выполнены:  $b_{ij} > |s_{b_{ij}} \cdot t|$ , поскольку не превысили по модулю произведение  $|s_{b_{ij}} \cdot t| = 0,866 \cdot 1,714 = 1,474$ . Табличное значение критерия Стьюдента определяли в Excel при помощи встроенной функции, имеющей синтаксис СТЬЮДРАСПОБР  $(0,1;23)=1,714$  для уровня доверительной вероятности 99 % и числа степеней свободы  $s = N-4 = 27-4=23$ .

Из табл. 3.2 видно, что коэффициенты в уравнении зависимости прочности от факторов все парные взаимодействия, за исключением произведения, являются не значимыми, что подтвердило результаты расчетов по критерию Стьюдента.

Первый столбец справа табл. 3.2 включает оценки коэффициентов для нелинейного уравнения регрессии при перекодированных значениях факторов. Первый и второй столбцы табл. 3.2 дают готовые коэффициенты уравнения регрессии без их перекодирования. Но удобнее анализировать уравнения в перекодированных значениях факторов, когда масштабы всех четырех независимых факторов условно одинаковы и находятся в интервале от  $-1$  до  $+1$ .

Для оптимизации условий проведенного эксперимента получили зависимости отклика «адгезионная прочность» от переменных факторов. Результаты проведенных исследований представлены в виде трехмерных графиков, полученных при помощи ПМ Статистика рис. 3.11.



Таблица 3.2

## Оценки эффектов для определения уравнений регрессии

Оценки эффектов; R-кв.=,93626;Скор.,86189 (Таблица 27 опытов.sta) 4 3-х уровневые ф, 1 Блоки; Остаточн.SS=8,342449 ЗП Адгезионная прочность, МПа							
Фактор	Эффект	Ст.Ош.	t(12)	p	-95% Дов.Пред	+95% Дов.Пред	Коэф.
Сред/Св.член	22,10437	0,602989	36,65798	0,000000	20,79057	23,41817	22,10437
(1)Температура формирования, °C(L)	-3,80640	1,556022	-2,44624	0,030804	-7,19668	-0,41612	-1,90320
Температура формирования, °C(K)	6,57132	1,385834	4,74178	0,000479	3,55184	9,59079	3,28566
(2)Продолжительность формирования, мин.(L)	9,54263	1,330896	7,17008	0,000011	6,64285	12,44240	4,77131
Продолжительность формирования, мин.(K)	3,34139	1,776049	1,88136	0,084399	-0,52828	7,21107	1,67070
(3)Частота УЗК, кгц(L)	-0,28519	1,480336	-0,19265	0,850454	-3,51056	2,94018	-0,14259
Частота УЗК, кгц(K)	3,34139	1,776049	1,88136	0,084399	-0,52828	7,21107	1,67070
(4)Амплитуда УЗК, мин.(L)	1,12175	1,335214	0,84013	0,417261	-1,78743	4,03093	0,56088
Амплитуда УЗК, мин.(K)	3,14139	1,776049	1,76875	0,102322	-0,72828	7,01107	1,57070
1L на 2L	-4,64470	1,674406	-2,77394	0,016838	-8,29292	-0,99649	-2,32235
1L на 3L	0,52296	1,651924	0,31658	0,757005	-3,07627	4,12219	0,26148
1L на 4L	0,30530	1,674406	0,18233	0,858366	-3,34292	3,95351	0,15265
2L на 3L	0,65757	1,579501	0,41631	0,684530	-2,78387	4,09900	0,32878
2L на 4L	-0,38462	1,413098	-0,27219	0,790106	-3,46350	2,69425	-0,19231
3L на 4L	-1,24357	1,623971	-0,76576	0,458619	-4,78190	2,29476	-0,62178

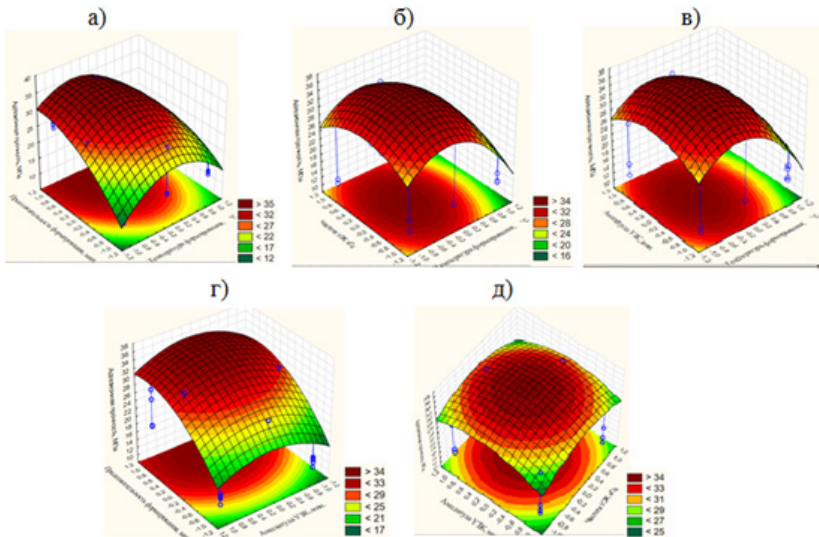


Рис. 3.11. Зависимость отклика «адгезионная прочность» от переменных факторов: а) «продолжительность формирования» и «температура формирования покрытия»; б) «частота ультразвука» и «температура формирования покрытия»; в) «амплитуда ультразвука» и «температура формирования покрытия»; г) «продолжительность формирования» и «амплитуда ультразвука»; д) «амплитуда ультразвука» и «частота ультразвука»

Для более точного изучения факторного пространства вблизи оптимального (максимального) значения отклика в ПМ Статистика есть модуль «Предсказания значений через функцию желательности», для получения которого можно задать полученные критические значения в кодированных переменных:  $x_1 = -0,288$ ;  $x_2 = 0,812$ ;  $x_3 = 0,002$ ;  $x_4 = 0,057$ . Этому сочетанию факторов модель предсказывает значение отклика  $y = 35,26$  МПа в доверительном интервале от 31,57 до 38,95 с 95 % уровнем предсказания (см. рис. 3.12).

Как показывает анализ рис. 3.12, наиболее значимыми факторами для получения желательности более 1 является сочетание факторов в кодированных значениях: «температура формирования, °C»  $x_1 = -0,8 \dots 0,4$  и «продолжительность формирования, мин»  $x_2 = 0,0 \dots 1,0$ . О том, насколько точно в центр факторного пространства попадает зависимость частоты от амплитуды УЗК можно судить по контуру полученной поверхности, что мы и наблюдаем на поверхности отклика (см. рис. 3.12 (з)), но границы варьирования факторов видны лучше на контурных линиях проекции.

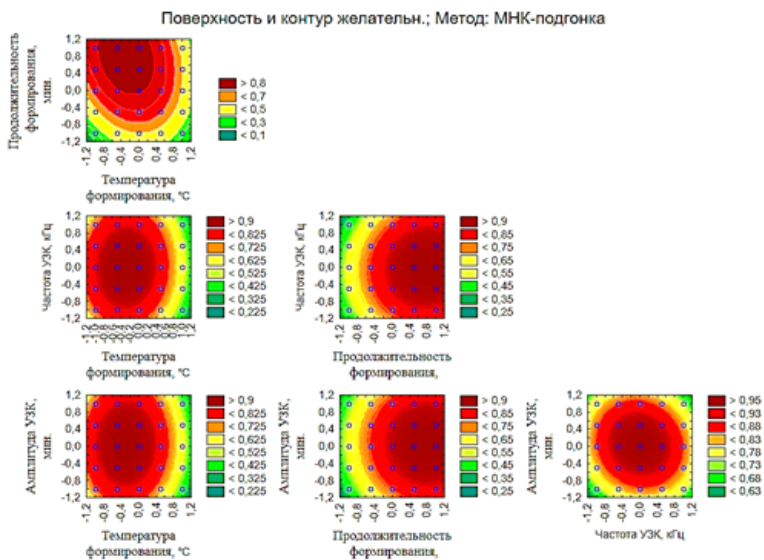


Рис. 3.12. Контурные линии поверхностей профиля желательности: за 1 принято предсказываемое моделью максимальное значение адгезионной прочности 35,26 МПа

Отсюда можно сделать вывод, что дальнейшее увеличение температуры формирования покрытия выше 0,4 в кодированных значениях не целесообразно. И напротив, снижение времени ниже середины факторного пространства приведет к понижению адгезионной прочности получаемого покрытия.

Подставив оптимальные значения  $x_{i\text{opt}}$  в уравнение (3.35), получили максимальное значение  $АП=35,26$  ПМа. В натуральных координатах оптимальные значения соответственно равны:  $x_{1\text{opt}}=212,344\approx 212$ ;  $x_{2\text{opt}}=25,261\approx 25$ ;  $x_{3\text{opt}}=20,772\approx 21$ ;  $x_{4\text{opt}}=11,253\approx 11$ .

Влияние и вклад каждого фактора в общее увеличение прочности представлены на рис. 3.13 и 3.14, полученные при помощи ПМ Статистика: наибольшее увеличение прочности дает фактор «продолжительность формирования, мин»  $x_2$  и квадратичный коэффициент перед фактором «температура формирования, °C»  $x_2^2$ . Но в то же время именно сочетание парного воздействия  $x_1 \cdot x_2$  снижают адгезионную прочность наиболее значимым образом, о чем можно судить по отрицательной величине абсолютного значения эффекта. При наиболее благоприятном сочетании факторов  $x_1 \dots x_4$  можно получать и более высокие значения прочности вплоть до 42 МПа, что значительно превосходит полученные на границах исследованного факторного пространства значения прочности и позволяет прогнозировать дальнейшее увеличение адгезионной прочности при очень незначительном варьировании входных параметров модели. Это заключение в очередной раз доказывает справедливость закона «Створа» И.А. Рыбьева для любых композиционных материалов [88]: наиболее экстремальному значению отклика соответствуют только оптимальные значения факторов.

Наиболее обобщенным критерием предсказания зависимых параметров отклика от варьируемых независимых факторов является коэффициент детерминации модели по критерию  $R^2$ . И хотя предсказание благодаря ПМ Статистика выходит не ниже  $R^2=0,95$ , но общий коэффициент корреляции между предсказанными по уравнению регрессии значения отклика модели с получаемыми результатами замеров в лаборатории для данной математической модели, рассчитанные в Excel при помощи встроенной

функции, имеющей синтаксис КОРРЕЛ от двух массивов  $y_{расч}$  по уравнению (2) и  $y_{ср}$ , было получено на уровне  $R^2=0,593$ , что можно также считать достаточно высоким уровнем предсказания математической модели.

Таким образом, с учетом установленного доверительного интервала и особенностей технологического процесса УЗП для предсказанного максимального значения АП независимых переменных  $x$  можно варьировать в пределах:  $200 < x < 220$ ;  $20 < x < 25$ ;  $18 < x < 22$ ;  $8 < x < 13$ , то есть формирование покрытий необходимо проводить при следующих технологических режимах: температура формирования –  $200...220$  °С; продолжительность формирования –  $20...25$  мин.; частота УЗК –  $18...22$  кГц; амплитуда колебаний торца волновода –  $8...13$  мкм [86].

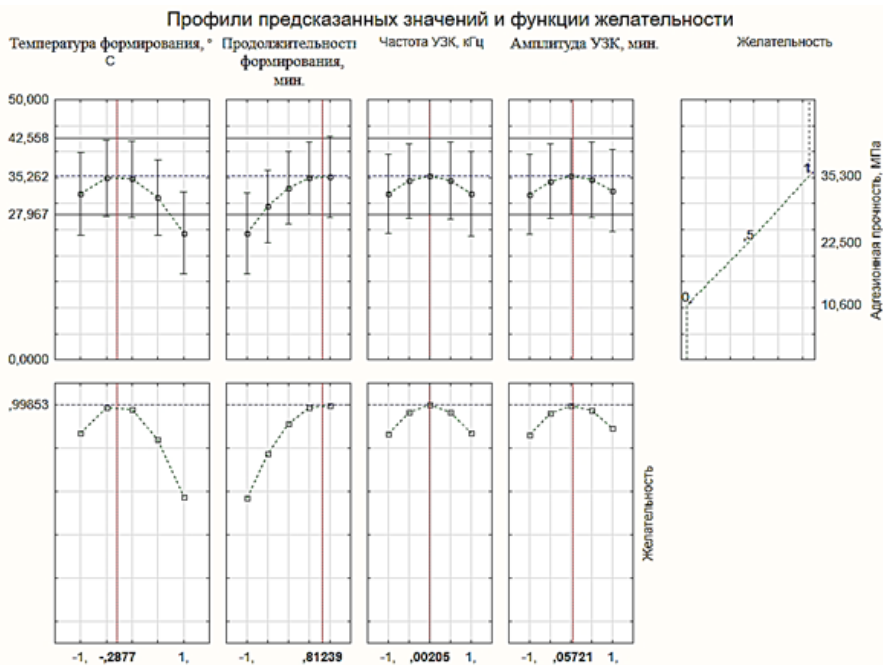


Рис. 3.13. Доверительные интервалы профиля желательности

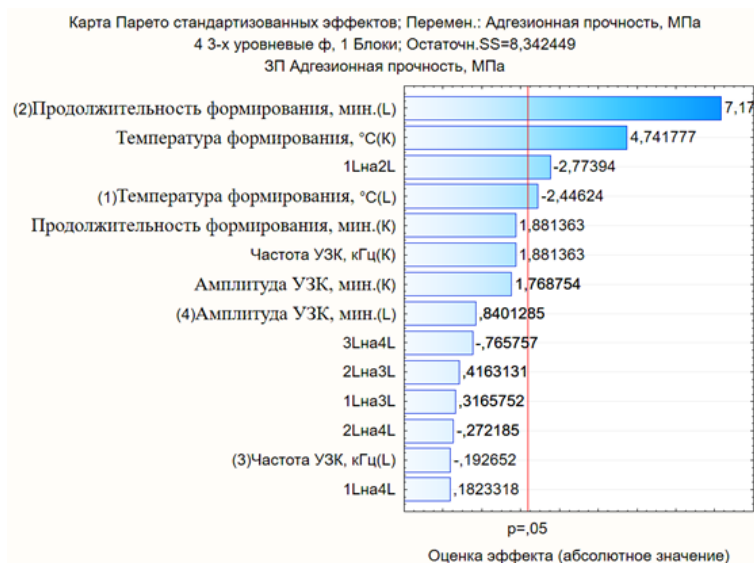


Рис. 3.14. Карта Парето для коэффициентов регрессии

Анализ результатов исследований (рис. 3.15 и 3.16) показал, что покрытия из разработанной композиции обладают большей адгезионной прочностью на стальных образцах, чем на чугунных и алюминиевых. Материал подложки влияет в большей степени на адгезионную прочность соединений, полученных без УЗП. Так, максимальное значение прочности сцепления адгезива со стальной основой выше на 28 %, чем с АЛ4 и составляет соответственно 32 МПа и 25 МПа.

Существенный рост адгезионной прочности покрытий с подложкой из АЛ4 за счет УЗП, вероятно, вызван способностью ультразвука ускорять термоокислительные, кристаллизационные и другие процессы, а также специфической особенностью морфологий поверхностного слоя подложки.

Наряду с этим следует отметить, что изменение адгезионной прочности за счет УЗП менее выражено для покрытий, сформированных на подложках из чугуна, что объясняется наличием включений графита на границе раздела фаз, которые ухудшают контакт полимера с подложкой.

Адгезионная прочность несколько повышается для покрытий, нанесенных на фосфатированных поверхностях по сравнению с нефосфатированными. Так, при нанесении покрытий на фосфатированные стальные поверхности адгезионная прочность увеличивается на 6...16 %, а при нанесении покрытий на образцы из алюминиевых сплавов, обработанных цинкофосфатным раствором КФ-2, – на 12...18 % (см. рис. 3.15 и 3.16).

Установлено, что покрытия, сформированные в УЗП, обладают большей адгезионной прочностью (рис. 3.16).

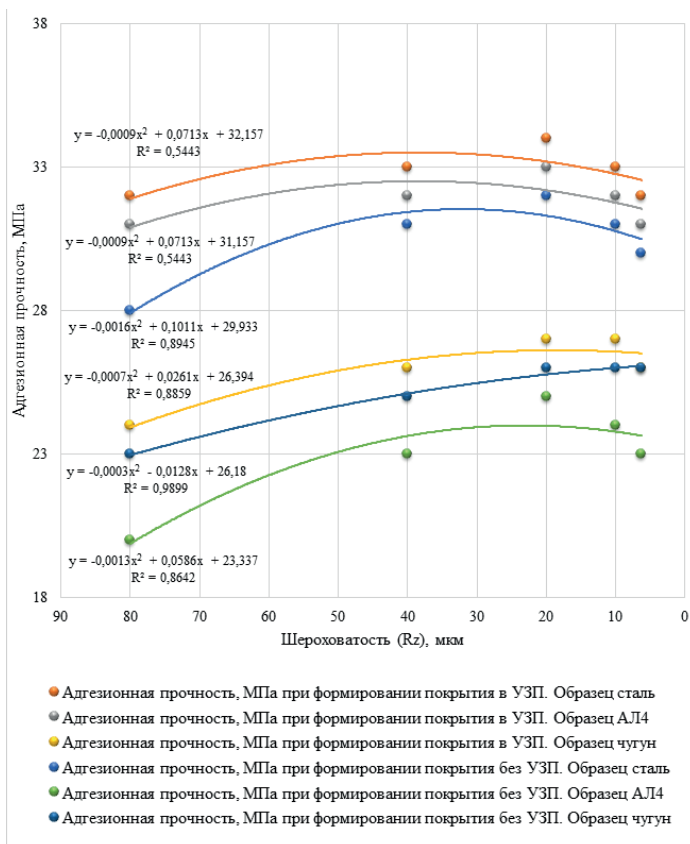


Рис. 3.15. Зависимость адгезионной прочности покрытий, нанесенных на немодифицированные подложки, от их шероховатости

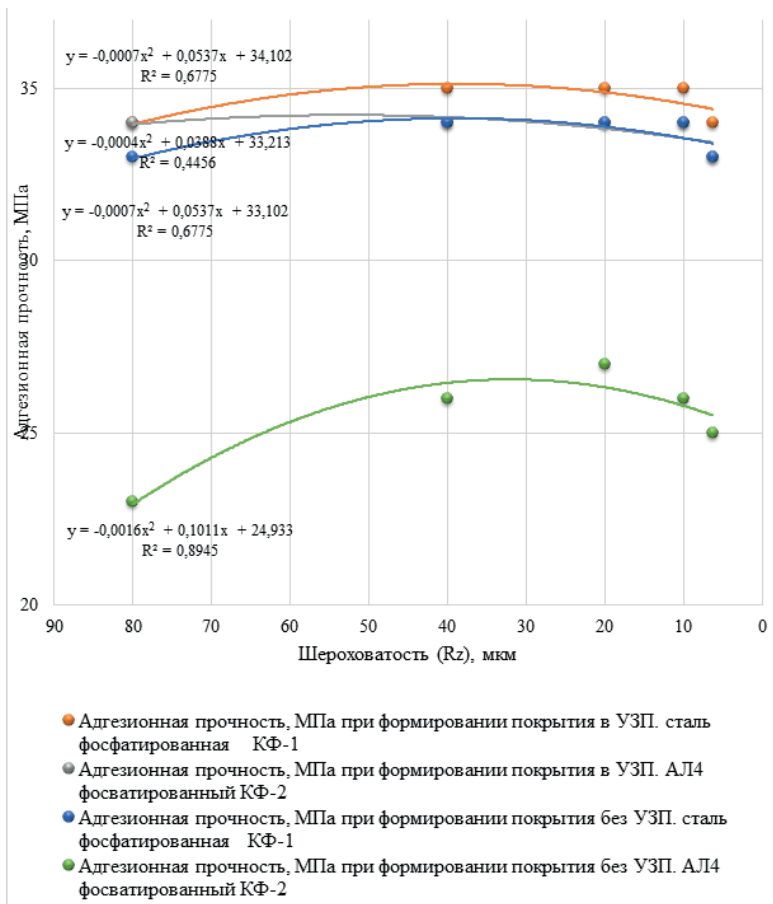


Рис. 3.16. Зависимость адгезионной прочности модифицированных покрытий от шероховатости подложки

Так, адгезионная прочность покрытий, сформированных в УЗП, выше на 3...5 % при нанесении на стальные образцы и на 23...40 % при нанесении на сплав АЛ4.

Зависимость адгезионной прочности от шероховатости подложки имеет экстремальный характер с максимальными значениями при  $R_z = 15...30$  мкм. Изменение адгезионной прочности от  $R_z$  менее зависимо для покрытий, полученных в УЗП, что явля-

ется следствием более полного заполнения микронеровностей в результате ультразвукового воздействия.

Таким образом, на адгезионную прочность существенное влияние оказывает материал подложки, состояние поверхности и её шероховатость. На процесс формирования покрытий значительное влияние оказывает ультразвуковое поле. В результате его воздействия на подложку во время формирования слоя полимера удалось существенно повысить адгезионную прочность (до 40 %). Следовательно, при выборе технологических параметров нанесения покрытий на детали машин с целью их восстановления, необходимо учитывать особенности и возможности камерного электростатического совмещенного с ультразвуковым воздействием способа формирования полимерных покрытий.



## **ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **4.1. Влияние технологических режимов на физико-механические свойства покрытий**

#### **4.1.1 Требования, предъявляемые к покрытиям, при восстановлении посадочных мест подшипниковых узлов**

Физико-механические свойства полимеров весьма разнообразны, поэтому при исследовании покрытий, полученных из них, необходимо исходить из условий их нанесения, формирования и эксплуатации [90].

Требования, предъявляемые к покрытиям, применяемым для восстановления посадочных мест подшипниковых узлов, в значительной степени определяются технологическими условиями формирования покрытий, особенно температурно-временными, силовыми, а также термообработкой. Следует отметить, что в литературе отсутствуют рекомендации по выбору технологических режимов формирования покрытий из стеклонаполненных порошкообразных полимеров, к которым относится изучаемая в данной работе композиция. Также отсутствуют данные о влиянии ультразвукового воздействия на такие свойства покрытий, как водо- и маслопоглощаемость, плотность, твердость, ударная прочность, которые оказывают существенное влияние на долговечность деталей, восстановленных полимерными покрытиями и применяемых в условиях ремонтного производства [91].

Поэтому для обоснования технологических режимов восстановления посадочных мест подшипниковых узлов опор качения композиционными полимерными покрытиями было необходимо изучить следующие вопросы:

1. Влияние температуры формирования и скорости охлаждения на влаго- и маслопоглощаемость и плотность покрытий, нанесенных в УЗП и в обычных условиях.

2. Влияние температуры формирования на твердость и ударную прочность покрытий.

Водо-, маслопоглощаемость и плотность определяли для покрытий, отделенных от подложки, и полученных из предложенной композиции в электростатическом поле с ультразвуковым воздействием или без такового (см. п/п. 2.2.). Толщина покрытия ( $0,5^{\pm 0,05}$ ) мм.

Образцы перед испытанием сушили в вакуум-сушильном шкафу в течение ( $24 \pm 1$ ) ч при температуре ( $50 \pm 2$ ) °С, затем охлаждали в эксикаторе над пятиокисью фосфора при температуре 23 °С. После охлаждения образцы взвешивали на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. Затем погружали отдельно в дистиллированную воду, отдельно в масло и выдерживали в течение ( $24 \pm 1$ ) ч., взвешивали. И так далее, пока последние 2 взвешивания не показывали одинаковые результаты.

Влагопоглощаемость изучали при температуре среды ( $+23 \pm 2$ ) °С, маслопоглощаемость – при температуре ( $+20 \pm 2$ ) °С и ( $+60 \pm 5$ ) °С.

Плотность определяли для покрытий, полученных при различных температурах формирования и в разных средах охлаждения (в воде, на воздухе и вместе с печью).

Твердость измеряли на твердомере МПВ-1 и оценивали по значению глубины вдавливания шарика диаметром 5 мм под нагрузкой 50 кГ. Измерения проводили на покрытиях толщиной ( $1 \pm 0,2$ ) мм, нанесенных на стальных образцах.

Ударную прочность определяли на приборе У-1А для покрытий, нанесенных на пластинки из стальной ленты 08 КП (70x150x1,0) мм, и оценивали произведением величины груза (в Н) на максимальную высоту (в м), с которой падает груз, не вызывающая разрушения слоя полимера.

Физико-механические свойства изучали на образцах после их выдержки в эксикаторе в течение 48 ч при комнатной температуре. Это вызвано необходимостью стабилизации структурообразования, релаксационных и других процессов, которые оказывают влияние на результаты измерений.

#### **4.1.2 Влияние условий формирования на влаго-, маслопоглощаемость и плотность покрытий**

Отличительной особенностью полимерных композиционных материалов является то, что они при эксплуатации в воде не подвергаются коррозии. Однако при этих условиях появляется гигроскопичность ПКМ, то есть в результате взаимодействия полярных групп полимера и жидкости появляется способность полимера поглощать влагу из воды и водных растворов. Это приводит к изменению геометрических размеров деталей и изменению их физико-механических свойств, а значит – к увеличению погрешности эксплуатации [75], что сказывается на долговечности восстановленных узлов.

Влаго- и маслопоглощаемость одновременно служат и критерием завершенности процесса образования покрытия, т.к. их значения растут с увеличением числа дефектов покрытий. Поэтому определение условий формирования покрытия, обеспечивающих наименьшую влаго- и маслопоглощаемость, является важной технологической задачей, решение которой позволит обоснованно назначить допуски и посадки сопряжений с деталями из ПКМ.

Изучение влияния температуры формирования на водопоглощаемость (рис. 4.1) показало, что с увеличением температуры влагопоглощаемость растет, это, по-видимому, вызвано интенсификацией порообразования в результате повышения термоокислительной деструкции [92].

В рамках одних и тех же температурных режимов отмечено понижение водопоглощаемости (до 1,13 %) у покрытий, сформированных в УЗП. Аналогичные покрытия, сформированные без воздействия УЗП, имеют водопоглощаемость в 1,4 раза выше и достигают 1,6 %. Это можно объяснить большей степенью кристалличности и более совершенной структурой покрытий, сформированных в УЗП. Подтверждением этих предположений является более пологий характер зависимости влагопоглощаемости от температур формирования покрытий.

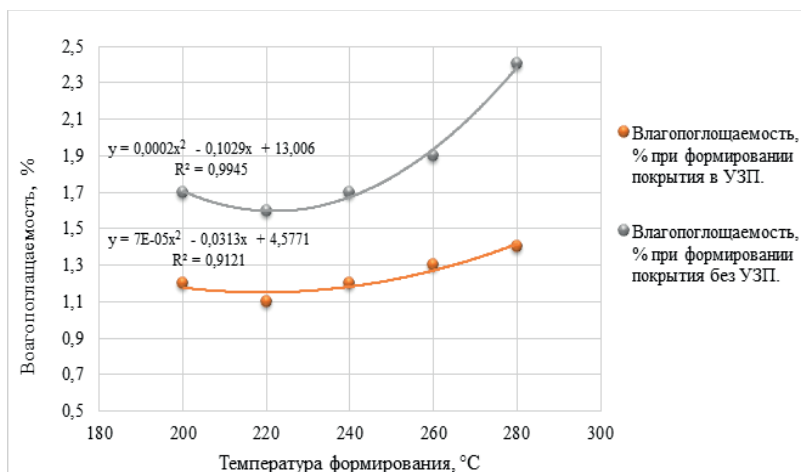


Рис. 4.1. Влияние температуры формирования на влагопоглощаемость покрытий при температуре среды 23 °C

Вероятно, ультразвук в диапазоне исследуемых температур способствует удалению из покрытий газовых включений и упорядочивает структурообразование. Такие же зависимости наблюдаются и при изучении маслопоглощаемости от температуры формирования покрытой [93].

Наибольшая маслопоглощаемость наблюдается при выдержке покрытий в масле с большей температурой (рис. 4.2). Так, при изменении температуры масла от 20 °C до 60 °C маслопоглощаемость возрастает, в среднем, в 1,3 раза для покрытой, сформированных без УЗП, и в 1,2 раза для покрытий, сформированных в УЗП.

Экстремальные значения маслопоглощаемости находятся в пределе температур 210...230 °C и имеют следующие значения: 0,29, 0,22 для покрытий, сформированных без УЗП; 0,15, 0,12 – сформированных в УЗП (первые значения приведены для покрытий, испытанных при температуре масла 60 °C, вторые – при 20 °C).

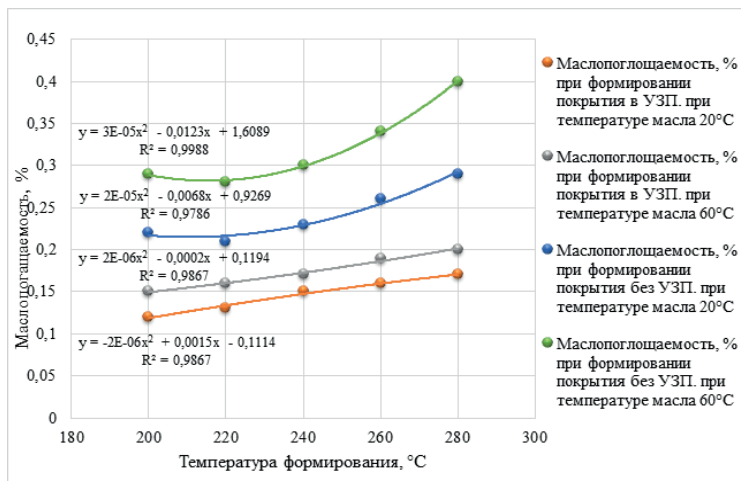


Рис. 4.2. Влияние температуры формирования на маслопоглощаемость

Таким образом, ультразвуковое воздействие способствует снижению влаго- и маслопоглощаемости до 1,4 раза, что, вероятно, обеспечивается более полной полимеризацией полимера, получением более совершенных адгезионных связей между составляющими самой композиции и более высокой плотностью упаковки структурных элементов.

Технологический процесс должен обеспечить получение покрытий с максимально-возможной плотностью. Повышение плотности обеспечивает возможность более точного изготовления линейных размеров, что очень важно при восстановлении деталей с жесткими допусками [94].

В ходе исследований была изучена зависимость плотности покрытия от температуры формирования и режимов охлаждения. Результаты исследований (рис. 4.3) показали, что плотность, по мере снижения температуры формирования и уменьшения скорости охлаждения покрытия, увеличивается и достигает максимального значения при температуре формирования 200...230 °C. Это можно объяснить изменением степени кристалличности полимера, от величины которой, как известно, зависит плотность упаковки макромолекул [95]. В свою очередь, процесс кристалли-

зации полимеров определяется условиями формирования покрытий. Вероятно, медленное охлаждение в печи приводит к образованию сильно закристаллизованных покрытий.

Ультразвуковое воздействие также способствует повышению плотности. Причем, плотность покрытий, сформированных в УЗП, менее зависима от температуры формирования и скорости охлаждения покрытий. Это можно объяснить способностью ультразвука уравнивать релаксационные процессы, упорядочивать структурообразование, а значит и увеличивать степень кристалличности полимерного покрытия.

Из вышесказанного следует, что активное воздействие УЗК на процесс формирования полимерных покрытий является эффективным средством увеличения плотности и снижения водо- и маслопоглощаемости, а, значит, и снижения дефектности покрытий.

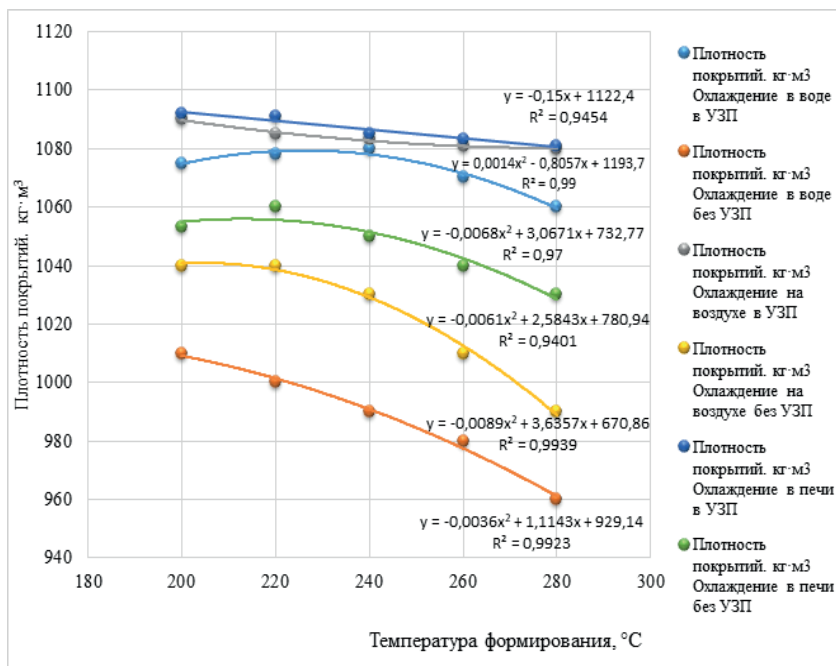


Рис. 4.3. Зависимость плотности покрытий от температуры формирования и скорости охлаждения покрытий

Одновременно следует отметить, что довольно высокая плотность покрытий получается и без воздействия УЗП, при температурах формирования (210...220) °С при очень медленном охлаждении (вместе с печью).

Таким образом, результатами проведенных исследований установлено, что оптимальные условия формирования покрытий из стеклонанополненных порошкообразных композиций на основе полиамида П-12 и эпоксидного олигомера, обеспечивающие получение низкой влаго-, маслопоглощаемости и высокой плотности, достигается при температуре формирования (210...230) °С с воздействием на подложку УЗП и последующим медленным охлаждением покрытия вместе с печью.

#### **4.1.3 Влияние условий формирования на ударную прочность и твердость покрытий**

Наряду с другими ценными свойствами полимерные покрытия обладают способностью поглощать энергию колебаний. Эта особенность пластмасс позволяет применять их в узлах, подвергающихся действию циклических нагрузок, увеличить точность работы узла, уменьшить шум и уровень вибрации [96].

Поглощение энергии колебаний характеризуется свойствами полимера, его молекулярной структурой, состоянием (температура эксплуатации, влажность, давление), наличием дефектов и пор.

Твердость и ударная прочность покрытий также меняется в зависимости от условий формирования (рис. 4.4). Для температур, при которых термодеструкция не наблюдается (200...220) °С, твердость и ударная прочность достигают наибольшее значение. Твердость покрытий, сформированных в УЗП, выше на 10...30 %, а ударная прочность на 6...12 %, чем у покрытий, сформированных при идентичных условиях без воздействия УЗП. Это можно объяснить повышенной плотностью и адгезионной прочностью покрытий, сформированных в УЗП, что коррелирует с данными, полученными в предыдущей главе настоящей работы.

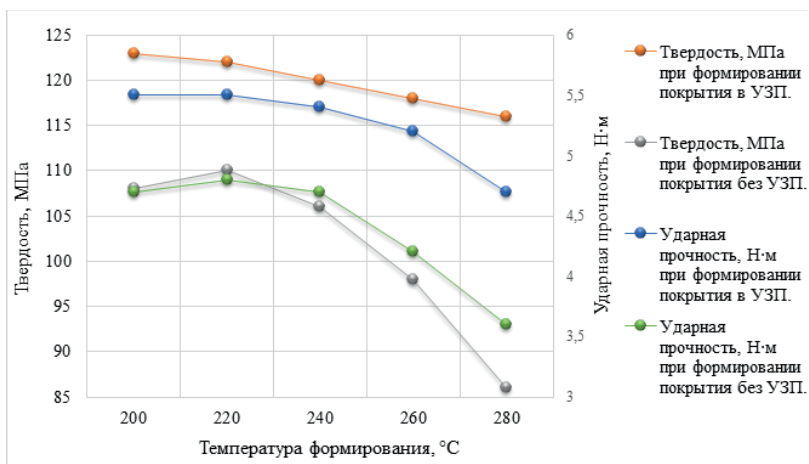


Рис. 4.4. Зависимость твердости и ударной прочности полимерных покрытий от условий формирования

## 4.2. Исследование работоспособности подшипниковых узлов автомобилей, восстановленных полимерными композиционными материалами

### 4.2.1 Факторы, влияющие на работоспособность подшипниковых узлов автомобилей, восстановленных полимерными композиционными материалами

Восстановление детали считается экономически целесообразным, если после восстановления они способны сохранить работоспособность в течении установленного нормативными требованиями ресурса. В настоящее время ресурс отремонтированных машин должен быть не менее 80 % от ресурса новых. Поэтому представляет большой практический и научный интерес исследование стабильности свойств покрытий, применяемых для восстановления изношенных деталей, анализ работоспособности отремонтированных деталей и узлов в целом [97].



Работоспособность деталей, восстановленных полимерными покрытиями, определяется, в первую очередь, адгезионной прочностью покрытий [78], которая в реальных условиях эксплуатации деталей меняется под действием влаги, температур, внешних механических нагрузок. Следует отметить, что в настоящее время в литературе недостаточно изучены вопросы стабильности адгезионных систем, полученных из порошкообразных композиций, также отсутствуют рекомендации по рациональному повышению стабильности физико-механических свойств полимерных покрытий, применяемых для восстановления посадочных мест подшипниковых узлов автомобилей.

Известно, что долговечность посадочных мест под подшипники качения во многом определяется физико-механическими процессами, происходящими в зоне контактирования сопрягаемых поверхностей. Меняя характер взаимодействия контактируемых поверхностей путем целенаправленной технологической подготовки, можно добиться существенного изменения работоспособности соединения [98].

Основными факторами, определяющими характер взаимодействия сопряжения, являются величина поля допуска соединяемых деталей и микрорельеф контактирующих поверхностей.

На величину допуска и форму микрорельефа значительное влияние оказывают геометрические параметры сопряжения, толщина покрытия, характер нагружения, типы и точность подшипника, условия эксплуатации, условия монтажа и демонтажа подшипника, физико-механические свойства покрытий восстановленных деталей.

В литературе имеются отдельные рекомендации по назначению посадок для сопряжений, восстановленных полимерными покрытиями [11, 40, 46], но они приводятся для конкретных материалов и часто не учитывают все факторы, оказывающие влияние на характер сопряжений. Поэтому требуется изучение влияния условий нагружения, толщины покрытия, поля допуска сопряжения и шероховатости восстановленных поверхностей на долговечность отремонтированных узлов.

Таким образом, для разработки эффективной технологии восстановления посадочных мест подшипниковых узлов автомобилей, обеспечивающих высокую долговечность отремонтированных узлов, необходимо изучить следующие вопросы:

1. Изменение адгезионной прочности в условиях воздействия влаги и переменных температур.

2. Влияние характера соединения подшипника качения с восстановленным посадочным отверстием на долговечность отремонтированных узлов.

3. Разработка технологических рекомендаций по восстановлению посадочных мест подшипниковых узлов с применением покрытий из разработанной композиции.

Исследования проводили в 3 этапа. Первый этап посвящался изучению стабильности адгезионной прочности покрытий. Стабильность оценивали изменением адгезионной прочности металлополимерных соединений в гидростатических условиях.

На втором этапе, используя математическое планирование экспериментов, изучали долговечность покрытий, нанесенных на натурные детали от условий нагружения и толщины покрытия. Испытанию подвергали подшипниковые узлы опор качения, состоящие из подшипникового щита электродвигателя и подшипника качения. Номинальный диаметр посадочного отверстия приняли равным 72 мм.

Критерием долговечности служил период времени до момента проворачивания наружного кольца подшипника в посадочном отверстии.

Испытания проводили по методике [40]. Режим испытаний и уровни варьирования выбрали приближенными к условиям эксплуатации восстановленных деталей, которые имели следующие значения:

- вид нагружения – радиальное переменное;
- частота вращения вала –  $1800 \text{ мин}^{-1}$ ;
- толщина покрытия ( $\tilde{x}_1 = 0,5^{+0,4} \text{ мм}$ );
- нагрузка на опоры ( $\tilde{x}_2 = 4^{\pm 3} \text{ кН}$ ).

Условия и результаты экспериментов приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

**Условия эксперимента и результаты исследования долговечности покрытий от толщины и нагрузки**

№ опыта	План в кодированных переменных		План в натуральных переменных		Результаты эксперимента	
	$x_1$	$x_2$	$\tilde{x}_1$ -толщина покрытия, мм	$\tilde{x}_2$ -нагрузка, кН	$L_{y3}^1$ , ч.	$L^2$ , ч.
1	-1	0	0,1	4	465	310
2	+1	0	0,9	4	365	190
3	+0,5	+0,87	0,7	7	250	10
4	+0,5	-0,87	0,7	1	450	270
5	-0,5	+0,87	0,3	7	300	75
6	-0,5	-0,87	0,3	1	460	360
7	0	0	0,5	4	410	240
8	0	0	0,5	4	400	252
9	0	0	0,5	4	410	252
10	0	0	0,5	4	412	236

На третьем этапе исследовали влияние поля допуска сопряжения и шероховатости восстановленных посадочных мест на прочность соединения и долговечность подшипниковых узлов. Одновременно изучали изменение характера посадки восстановленных подшипниковых узлов от способа и количества сборок.

Шероховатость оценивали по традиционно применяемому параметру  $R_a$  и по параметру формы  $t_p$ . Эти параметры наиболее полно характеризуют контактную жесткость прессовых соединений [99].

Шероховатость определяли путем обработки профилограмм, полученных на профилографе-профилометре «Калибр 201» по ГОСТ 19300-86 Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Профилографы-профилометры контактные. Типы и основные параметры.

Различные значения шероховатости посадочного отверстия достигали изменением режимов механической обработки и геометрии режущего инструмента. Механическую обработку проводили на токарном станке 1К 62. При необходимости посадочное отверстие шлифовали тонкой шлифовальной шкуркой [100].

<sup>1</sup> долговечность покрытий, сформированных в УЗП

<sup>2</sup> долговечность покрытий, сформированных без УЗП

Условия контактирования существенно изменяются при многократной сборке соединений. Так как наибольшее смятие микронеровностей происходит при механической сборке, было изучено изменение натяга и шероховатости от значения начального натяга и количестваборок. Исследования проводили по плану, приведенному в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Условия эксперимента и результаты изменения натяга и шероховатости от начального натяга и количестваборок

№ опыта	План в кодированных переменных		План в натуральных переменных		Натяг, мкм	$t_{сб}, \%$
	$x_1$	$x_2$	$\bar{x}_1$ -числоборок	$\bar{x}_2$ -начальный натяг, мкм		
1	-1	0	0	50	50	25
2	+1	0	12	50	20	50
3	+0,5	+0,87	9	80	30	70
4	+0,5	-0,87	9	20	10	42
5	-0,5	+0,87	3	80	50	60
6	-0,5	-0,87	3	20	15	35
7	0	0	6	50	25	50
8	0	0	6	50	25	50
9	0	0	6	50	30	45
10	0	0	6	50	25	50

#### 4.2.2 Изменение адгезионной прочности полимерных покрытий в условиях гидростатического воздействия

Для конкретных условий использования адгезионных соединений уменьшение адгезионной прочности приводит к разрушению покрытия и в конечном счете к выходу из строя узла в целом. Поэтому важно знать действительный срок эксплуатации восстановленных деталей и возможности его повышения.

Исследования (рис. 4.5) показали, что покрытия, сформированные в УЗП, обладают более стабильной адгезионной прочностью. Так, покрытия, сформированные в УЗП на подложках из алюминиевых сплавов, отслоились после 340 ч выдержки в гигростате при температуре 60 °С и относительной влажности воздуха

95–100 %. Покрытия, сформированные без воздействия УЗП, при выдержке в аналогичных условиях, отслоились после 46 ч. Значительно больше выдержали термостатическое воздействие покрытая, нанесенные на стальных подложках (840 ч и 140 ч соответственно, для сформированных в УЗП и без воздействия УЗП).

Повышенную стабильность адгезионной прочности покрытий, сформированных в УЗП, можно объяснить увеличением числа адгезионных связей между покрытием и подложкой с одновременным их усилением в результате эффекта ультразвукового воздействия. По-видимому, это достигается тем, что в начальный период образования адгезионного контакта УЗК создают вынужденную конвекцию в расплавленном полимере, разрушают пограничный слой, интенсифицируют удаление газовых включений с поверхности раздела фаз.

В последующем периоде, после установления молекулярного контакта, ультразвук способствует активации диффузии концов и сегментов макромолекул полимера с одновременной интенсификацией взаимодействий функциональных групп адгезива с ионами металла или оксида, то есть способствует интенсификации межфазных молекулярных сил.

Можно также предположить, что и последующие стадии формирования металлополимерного соединения – образование химических связей между полимерами и подложкой, формирование структуры покрытия - существенно изменяются под воздействием радиационного давления ультразвука.

Анализ результатов исследований также показал, что с повышением температуры стабильность адгезионной прочности резко снижается (рис. 4.5). Так, покрытия, сформированные на подложках из алюминиевого сплава, без воздействия УЗП, отслоились после 100 ч выдержки при 40 °С, а при температуре 60 °С – после 46 ч. Аналогичная закономерность наблюдается и для покрытий, сформированных в УЗП. Этот факт согласуется с кинетической концепцией адгезионной прочности, в соответствии с которой под тепловым воздействием интенсифицируется термофлуктационный механизм. В результате этого происходит ослабление молекулярных связей, а потом и их разрыв.

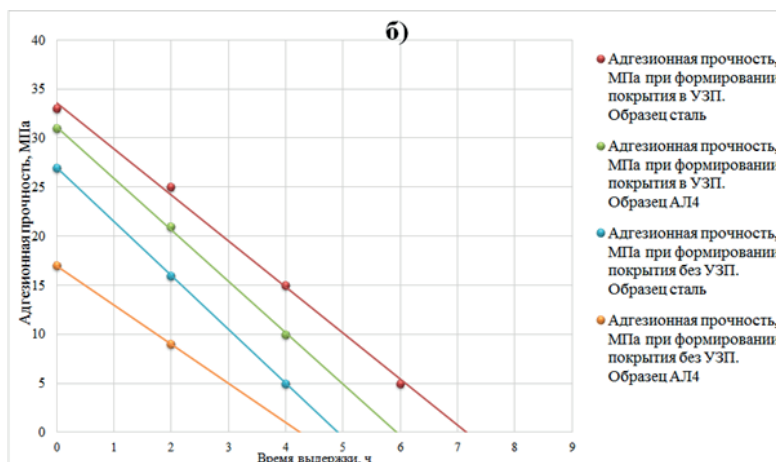
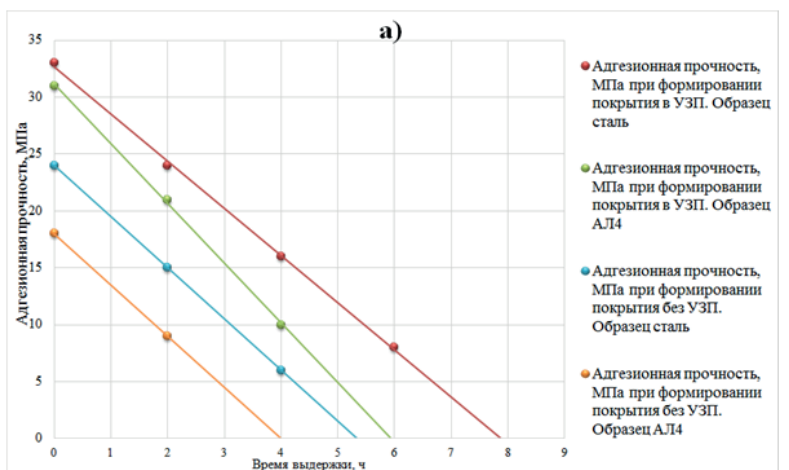


Рис. 4.5. Изменение адгезионной прочности полимерных покрытий от продолжительности выдержки в гидростате при 40 °С (а) и 60 °С (б)

Таким образом, качественные изменения, имеющие место в результате термического и ультразвукового воздействия, оказывают значительное влияние на стабильность адгезионной прочности металлполимерных систем [101].

### 4.2.3 Влияние условий нагружения и толщины покрытия на долговечность адгезионных металлополимерных соединений

Известно, что внешние нагрузки способны ускорить термо-функциональный разрыв межфазных адгезионных связей [102]. Релаксационные процессы, протекающие в адгезионных металлополимерных системах, не одинаковы по толщине покрытия и зависят от ее величины [103]. Эти особенности оказывают значительное влияние на долговечность адгезионных соединений. Поэтому изучали зависимость адгезионной прочности покрытий от условий нагружения и толщины покрытия.

На основе регрессионного анализа результатов экспериментов (см. табл. 4.1) получены полиномиальные модели, которые в кодированных координатах имеют вид:

$$L = 247,8 - 65,83x_1 - 158,05x_2 - 93,32x_2^2 \quad (4.1)$$

$$L_{yз} = 412,35 - 43,3x_1 - 104,4x_2 - 66,79x_2^2 - 23x_1x_2 \quad (4.2)$$

где  $L$  – долговечность покрытий подшипниковых узлов, ч. покрытия, сформированные без воздействия УЗП;  $L_{yз}$  – долговечность покрытий подшипниковых узлов, ч. покрытия, сформированные с воздействием УЗП;  $x_1$  – толщина покрытия, мм;  $x_2$  – нагрузка на подшипник.

Изолинии поверхностей отклика приведены на рис. 4.6.

Исследования показали, что долговечность деталей, восстановленных полимерными покрытиями, в значительной степени зависит от условий нагружения и толщины покрытия. Влияние толщины покрытий, сформированных без воздействия УЗП, не зависит от влияния нагрузки (поскольку  $B_{12} = 0$ ) или зависит незначительно для покрытий, сформированных в УЗП.

Увеличение нагрузки и толщины покрытия приводит к понижению долговечности ( $b_1 < 0$  и  $b_2 < 0$ ), причем нагрузка оказывает наиболее существенное влияние ( $B_1 < B_2$ ). Максимальная долговечность достигается при минимальной нагрузке и минимальной толщине покрытия ( $b_1, < 0$  и  $b_2 < 0$ ).

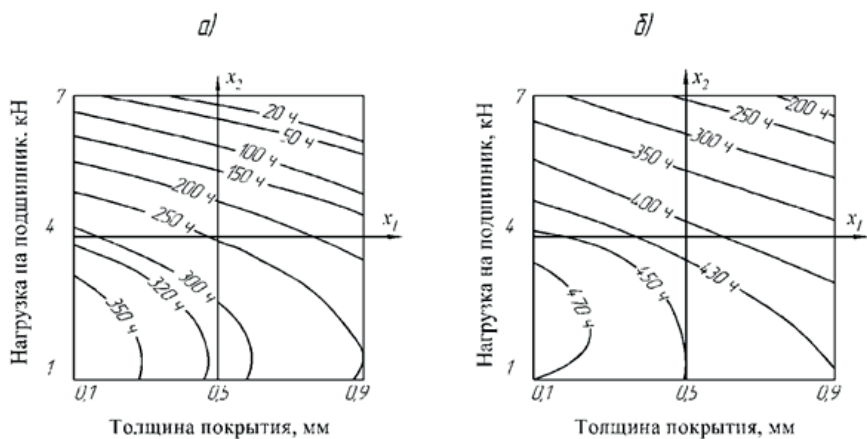


Рис. 4.6. Зависимость долговечности полимерных покрытий, нанесенных на посадочные места подшипниковых узлов щитов генераторов, от условий нагружения и толщины покрытия: а – покрытие сформировано без УЗП; б – в УЗП

Долговечность металлополимерных систем, сформированных в УЗП, выше, чем у систем, сформированных без воздействия УЗП. Так, при нагрузке 1 кН и толщине покрытия 0,1 мм долговечность озвученных систем по сравнению с не озвученными выше на 24 % и составляет соответственно 470 ч и 378 ч. Это отношение растет и достигает наибольшего увеличения при максимальной толщине и максимальной нагрузке. При этих условиях озвученные покрытия проработали около 170 ч, а неозвученные – не более 10...20 ч. Такое поведение полимерных покрытий согласуется с современными представлениями о поведении хрупких тел с позиции теории адгезионной прочности разных материалов.

Хотя соединения состоят из различных материалов, которые имеют разную физико-химическую природу, процесс разрушения подчиняется существующим теориям физики разрушения полимеров [104], согласно которым стабильность материалов зависит от сопротивления распространения трещин, энергии активации термической деструкции полимера, внутренних напряжений и модуля упругости. С изменением нагрузки на покрытие изменяется и кинетика указанных факторов. Очевидно, что ультразвук



способствует повышению сопротивляемости материалов к образованию концентраторов напряжений (трещин), а также уменьшению напряжения межфазных молекулярных сил и внутренних напряжений в полимерных покрытиях.

Неодинаковые значения долговечности адгезионных систем при различной толщине полимерных покрытий связаны с тем, что увеличение толщины покрытия ухудшает отвод тепла, образующегося в процессе эксплуатации. Это вызывает повышение температуры в рабочей зоне, появление термодеструкции, изменение прочности и деформируемости покрытий. Одновременно повышение толщины покрытия приводит к уменьшению скорости протекания релаксационных процессов в покрытии, что ухудшает качество адгезионного соединения.

Ультразвук изменяет релаксационные процессы на границе раздела фаз и в самом покрытии, что приводит к упорядочению структуры по всей толщине покрытия [105].

Таким образом, анализ результатов исследований показал, что полимерные покрытия, сформированные в УЗП, способны выдерживать более высокие нагрузки (до 7 кН) по сравнению с аналогичными покрытиями, но не озвученными. Долговечность таких покрытий выше и менее зависима от толщины слоя полимера.

При разработке технологического процесса необходимо учитывать, что покрытия, имеющие небольшую толщину (0,1...0,4 мм) и подвергающиеся нагрузкам до 4 кН, могут успешно работать и без их обработки УЗК, т.е. при назначении ультразвукового воздействия необходимо учитывать условия эксплуатации восстановленных деталей.

#### **4.2.4 Влияние посадки на прочность и долговечность соединений**

Из проведенного нами анализа следует, что наибольшая долговечность сопряжений подшипниковых узлов, восстановленных полимерными покрытиями, достигается при их соединении с незначительным натягом. Поэтому требует дополнительных исследований зависимость долговечности и прочности соединения от натяга.

Исследования показали (рис. 4.7 и 4.8), что высокая долговечность наблюдается при соединении деталей по посадке с незначительным натягом. Уменьшение долговечности для сопряжений с нулевым натягом или с зазором объясняется тем, что наружное кольцо подшипника начинает от самого начала испытаний проскальзывать по посадочной поверхности. Ввиду того, что пластмассы имеют низкие упругие свойства, микронеровности посадочной поверхности быстро выглаживаются, что приводит к появлению зазора между подшипником и корпусом.

В результате силовых и температурных деформаций, имеющих место в условиях трения и ударных нагрузок, силы сцепления между сопрягаемыми поверхностями уменьшаются, поверхностный слой, а затем и всё покрытие разрушается. Следует отметить, что долговечность покрытий, сформированных в УЗП, достаточно высокая и при нулевом натяге. Это объясняется лучшими физико-механическими свойствами указанных покрытий по сравнению с покрытиями, сформированными в обычных условиях.

Наивысшая долговечность (до 320 ч) наблюдается у сопряжений с натягом 15...40 мкм. Для соединений с натягом 20 мкм (на графике точка обведена кругом) испытания проводились при двух сборках. Это было вызвано значительным износом подшипника и вала. После распрессовки подшипника на установочных поверхностях не удалось проследить явных изменений в геометрии посадочного отверстия. При натяге 15...40 мкм зона контактирования соединяемых поверхностей увеличивается за счет получения равновесной шероховатости, под которой следует понимать шероховатость, устанавливающуюся на границе контакта в результате ползучести и релаксации полимера.

При натяге больше 40 мкм также получается равновесная шероховатость, но при этом имеют место существенные деформационные изменения в покрытии и на границе раздела фаз в зоне адгезионного контакта. Это происходит потому, что во время запрессовки подшипника максимально выступающие микронеровности срезаются или под усилием сдвига нарушают адгезионные связи между подложкой и адгезивом. С увеличением натяга более 70...80 мкм сплошность покрытия нарушается в результате среза слоя полимера во время запрессовки подшипника и поэтому не

представляется возможным получать нормальное соединение (на графике 4.7 это показано вертикальной линией).

Характер зависимости усилия запрессовки и распрессовки от натяга сохраняется для различных диаметров соединения. Однако при одном и том же натяге усилия запрессовки и распрессовки меняется в зависимости от диаметра сопряжения. С увеличением диаметра сопряжения усилия запрессовки и распрессовки растут примерно пропорционально изменению радиуса сопряжения.

В реальных эксплуатационных условиях часто приходится эксплуатировать механизмы машин после повторной сборки. Поэтому для оценки свойств восстановленных соединений важно знать их прочность после повторной сборки.

Исследования показали, что прочность соединения (усилия распрессовки) после повторной сборки в несколько раз ниже, чем после первой сборки (рис. 4.8). Это можно объяснить смятием микронеровностей после первой сборки и получением установившегося характера сопряжения. Зависимость имеет, практически, линейный характер. При этом прочность соединения менее чувствительна к изменению начального натяга.

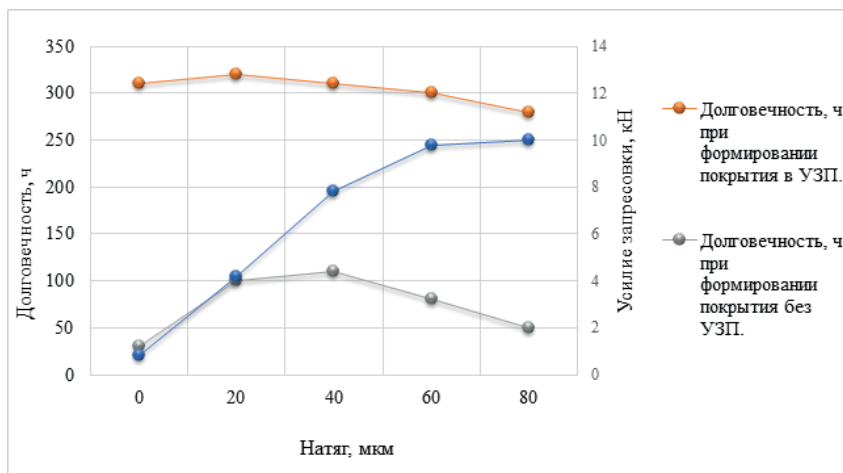


Рис. 4.7. Влияние начального натяга соединения на долговечность и усилие запрессовки

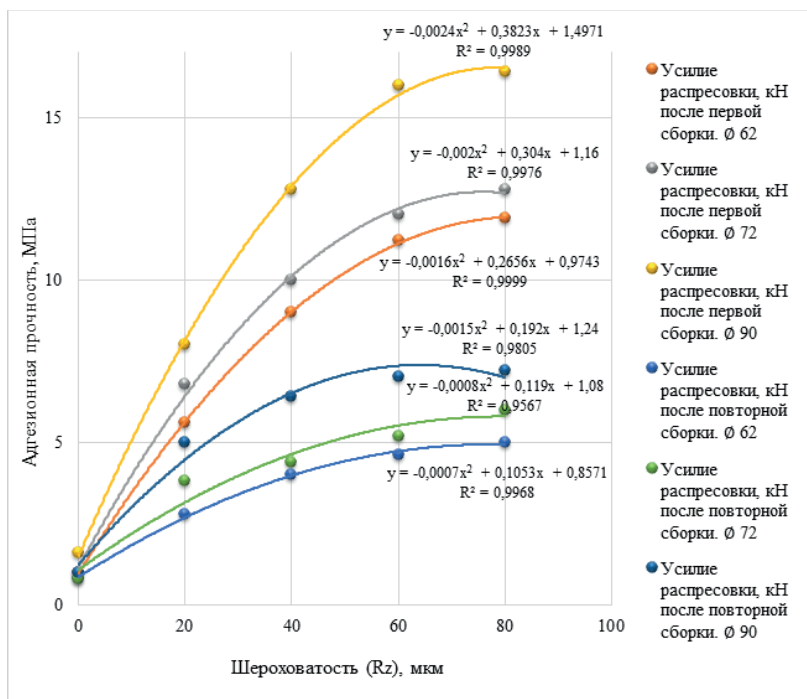


Рис. 4.8. Влияние начального натяга на усилия распрессовки при различных диаметрах и способах соединения: 1 – Ø 62 мм; 2 – Ø 72 мм; 3 – Ø 90 мм; толщина покрытия 0,5 мм; нагрузка на подшипник 5 Кн

На основе проведенных исследований можно назначить посадку для подшипниковых узлов опор качения, восстановленных полимерными покрытиями. В связи с тем, что максимальная долговечность достигается при начальном натяге, равном 15...40 мкм, для покрытий, полученных без воздействия УЗП, и 0...60 мкм для покрытий, сформированных в УЗП, посадочные места можно обрабатывать, соответственно, для первого случая по Р6, для второго – по N7 или P7.

Посадочные места подшипниковых узлов рекомендуется обрабатывать по N7 - в случае однократной сборки, по P7 - в случае необходимости многократной сборки узла.

Таким образом, применение полимерных покрытий, сформированных в УЗП для восстановления посадочных мест подшипниковых узлов крышек генераторов автомобилей, позволяет повысить их качество и уменьшить точность механической обработки на один квалитет по сравнению с крышками, выпускаемыми серийно. Это положительно сказывается на экономическую целесообразность применения предлагаемого способа восстановления.

## **ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОСАДОЧНЫХ МЕСТ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ КАМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ**

### **5.1. Общее описание технологического процесса**

На современном этапе развития ремонтного производства предъявляются новые, более высокие требования к технологии восстановления и ремонта деталей и узлов автомобильной техники [106].

Технологический процесс должен обеспечить возобновление первоначальных функциональных свойств деталей при наибольшей производительности и минимально-возможных затратах. Это возможно достичь установлением оптимальной последовательности операций процесса, выбором эффективного способа и режимов их выполнения, оборудования, оснастки и инструмента [107].

Лабораторные и стендовые исследования позволили обосновать выбор способа и режимов нанесения покрытий из порошкообразных композиций при восстановлении посадочных мест подшипниковых узлов корпусных деталей. Следует отметить, что особенности производственных условий требуют индивидуального подхода при решении вопроса восстановления конкретных деталей. Так, предварительные исследования показали, что при нанесении покрытий на посадочные поверхности подшипниковых узлов не обеспечиваются необходимой равномерностью покрытия по длине и периметру покрываемой поверхности.

Выявлено, что равномерность можно улучшить изменением формы и размеров переходной насадки дозирующего устройства (поз. 6 рис. 5.2), которая выполняет роль демпфера воздушного порошка и частиц порошка, перемещаемых к покрываемой поверхности.

Для успешного дальнейшего внедрения технологии в производство следует разработать классификацию деталей, восстанов-

ление которых возможно разработанным способом с предлагаемой композицией, а также дать технико-экономическую оценку технологии.

При разработке технологии восстановления решали следующие вопросы:

1. Разработать эффективное оборудование и оснастку для нанесения, формирования и последующей механической обработки покрытия.

2. Разработка технологического процесса восстановления посадочных мест подшипниковых узлов крышек генераторов автомобилей.

3. Внедрение технологии в производство и ее технико-экономическое обоснование.

Исследования проводили в три этапа.

На первом этапе разработали оборудование и оснастку для нанесения, формирования и дальнейшей механической обработки покрытия.

Были исследованы конструктивные параметры и проведены эксплуатационные и технико-экономические показатели внедрения оборудования и оснастки. Для этого изучали равномерность покрытий, полученных с применением технологического оборудования. Затем для насадки, обеспечивающей лучшую равномерность покрытия, исследовали отношение диаметра демпфирующего отверстия к диаметру восстанавливаемого посадочного места под подшипник на равномерность покрытия по периметру и длине посадочного отверстия. Это позволило обосновать выбор насадки при восстановлении корпусных деталей, имеющих разные размеры посадочных мест.

Равномерность покрытий оценивали по наибольшему отклонению от круглости и по наибольшему отклонению профиля продольного сечения цилиндрической поверхности. Покрытия наносили на стальные образцы (рис. 5.1) диаметром отверстия 42 мм, глубина 65 мм. Форма отверстия круглая с полутлуким дном. Поверхности 1 и 2 обрабатывали с одной установки на токарном станке, что обеспечивало минимальное отклонение от соосности. Измерения проводили в двух поясах а-а и б-б и в пяти сечениях на установке для измерения износа посадочных мест (см. рис. 2.3).

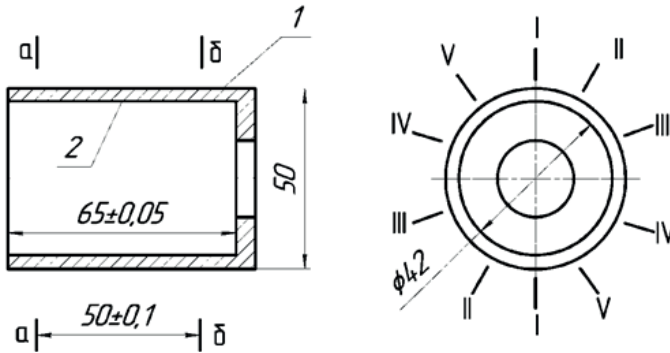


Рис. 5.1. Образец и схема измерений отклонения

Базирование образцов осуществляли по наружной поверхности вращением индикаторного нутромера в сторону наименьшего и наибольшего отклонения от установочного номинального размера отверстия. Затем определяли равномерность покрытия.

Толщину покрытия определяли вычитанием диаметра до нанесения покрытия из диаметра покрытого отверстия.

На втором этапе была установлена последовательность выполнения технологических операций, разработаны рекомендации по выбору технологических режимов нанесения и формирования покрытий.

Третий этап был посвящен эксплуатационной проверке восстановленных деталей, разработке производственных рекомендаций по внедрению технологии в производство и технико-экономической оценке проведенной работы.

## 5.2. Разработка технологического оборудования и оснастки

Выбор оборудования – одна из важнейших задач составления любого технологического процесса. Оборудование должно обеспечить необходимую производительность и качество работы, быть удобным и безопасным в эксплуатации, иметь минималь-



ные приведенные затраты на выполнение технологического процесса и минимальный срок окупаемости [108].

Производственные испытания показали, что целесообразно отделить операции нанесения полимерного порошка и его оплавление. Это связано с технологической сложностью оплавления порошка непосредственно на установке для его нанесения, а также с экономическими соображениями – продолжительность оплавления порошка значительно больше продолжительности его нанесения – что сказывается на производительности процесса восстановления. Поэтому была специально разработана установка для нанесения покрытий с последующим оплавлением порошка в термопечи – в случае формирования покрытий без УЗП, и на специальной установке для нагрева и формирования покрытия с воздействием УЗП.

Установка для нанесения покрытий (рис. 5.2) состоит из вибровихревой ванны и источника высокого напряжения. Вибровихревая ванна представляет собой закрытый объем, изготовленный из токонепроводящего материала (например, стеклопластика) и состоящего из воздушной камеры 1 и камеры напыления 3. Камеры разделены пористой перегородкой 2, под которой установлена электродная сетка 4, которая подключена к источнику высокого напряжения 12. Покрываемая деталь устанавливается на переходной насадке 6 и фиксируется зажимом 9, в котором смонтирован магнитострикционный преобразователь с волноводом 11.

Полимерный порошок приводится в псевдосжиженное состояние в результате вибрационного воздействия, полученного от электромагнитного вибратора 13 и вихревого воздействия, полученного из воздушной магистрали 16. Давление воздуха регулируется манометром 14, а очистка воздуха осуществляется при его прохождении через масло-влагоотделитель 15.

Во время псевдосжижения порошка на электродную сетку подают высокое напряжение (30–60 кВ). Заряженные частицы полимера оседают на покрываемую деталь, имеющую противоположный заряд. Полимерный порошок имеет доступ только к поверхности восстанавливаемой посадочной поверхности. Выход полимерного порошка через верхнее отверстие закрыт специальной перегородкой, состоящей из тканевого фильтра 11 и упора 10.

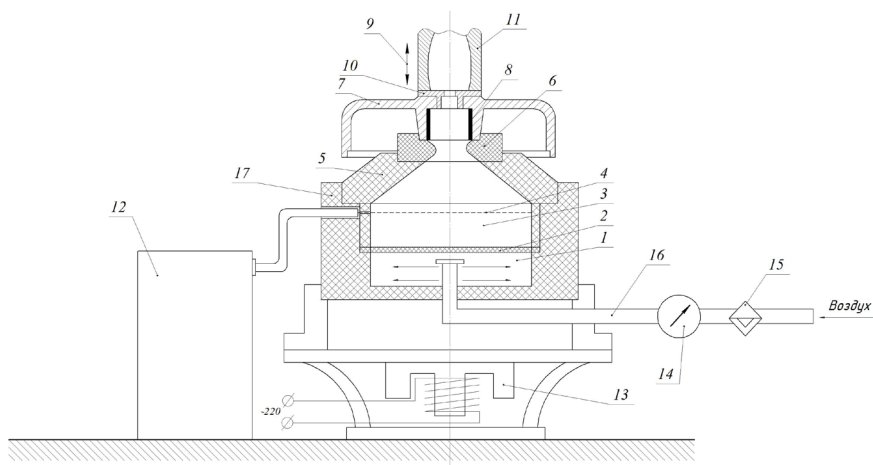


Рис. 5.2. Схема установки для нанесения полимерных покрытий: 1 – камера воздушная; 2 – пористая перегородка; 3 – камера напыления порошка; 4 – электродная сетка; 5 – крышка; 6 – насадка; 7 – восстанавливаемая деталь; 8 – покрытие; 9 – зажим; 10 – упор; 11 волновод; 12 – источник высокого напряжения; 13 – вибратор; 14 – манометр; 15 – масло-влажнотделитель; 16 – воздушная магистраль; 17 – корпус

Геометрическая форма и размер переходной насадки, через которую проходит полимерный порошок во время его осаждения на детали, оказывают существенное влияние на качество и толщину покрытия, а значит и на производительность процесса. При проектировании установки необходимо придать демпфирующему отверстию насадки гиперболоидную форму. Минимальный диаметр демпфирующего отверстия должен быть равен  $(0,4 \dots 0,6) D_n$ . При таком соотношении достигается максимальная производительность при минимальных отклонениях покрытия от правильной формы.

Для оплавления полимера была разработана установка (рис. 5.3), которая отличается тем, что для интенсификации процесса формирования покрытий используется ультразвуковое воздействие на деталь, а для нагрева – три индукционных печи, имеющие вертикальное возвратно-поступательное движение.

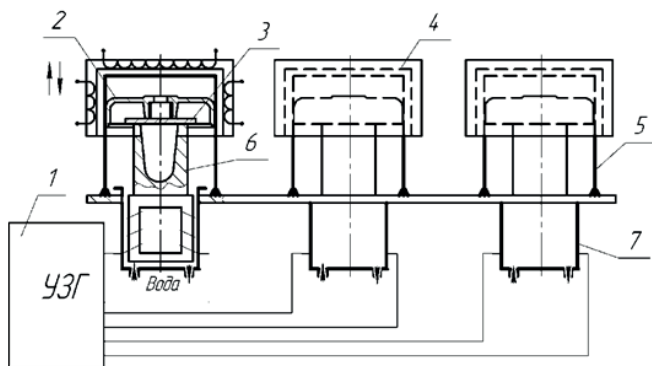


Рис. 5.3. Установка для оплавления порошка в УЗП:

1 – Ультразвуковой генератор; 2 – деталь; 3 – волновод; 4 – прижим; 5 – тяги;  
6 – подставка; 7 – корпус

Волноводы 3 установлены на жесткой подставке 6 и подключены к ультразвуковому генератору 1. Деталь 2 после нанесения порошкообразного полимера на установке для нанесения порошка устанавливается на волновод и прижимается зажимом 4. Затем печь опускают над деталью и выдерживают в таком положении до оплавления порошка, после чего печь поднимают вверх и деталь отправляют на механическую обработку после ее охлаждения.

Для получения ультразвуковых колебаний используют промышленные генераторы типа УЗГ с постоянным режимом подачи УЗК.

Конструкция волноводов определяется размерами и формой восстанавливаемых деталей. Для обеспечения эффективной передачи ультразвуковых колебаний необходимо обеспечить хороший контакт между волноводом и покрываемой деталью.

Для механической обработки посадочных отверстий деталей типа крышка генератора разработано специальное приспособление, которое обеспечивает получение необходимой точности обработки посадочного отверстия (6–7 качеством) и необходимую соосность посадочного отверстия (см. рис. 5.4). Сменные насадки 5 позволяют обеспечить большую универсальность приспособления, что позволяет обрабатывать номенклатуру деталей типа посадочных мест подшипников крышек генераторов, щитов электродвигателей.

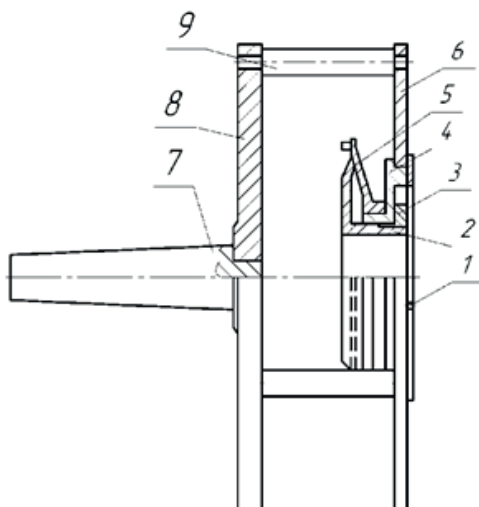


Рис. 5.4. Схема приспособления для механической обработки подшипниковых мест крышек генераторов: 1 – гайка; 2 – упор; 3 – дисковая пята; 4 – переходная втулка; 5 – сменная мембрана; 6, 8 – упорные диски; 7 – установочный конус; 9 – распорка

Приспособление выполнено в виде мембранного патрона (рис. 5.4) и состоит из двух дисков 6 и 8, связанных между собой распорками 9. Один из дисков снабжен установочным конусом 7, для крепления в шпинделе токарно-винторезного станка. На втором диске неподвижно закреплена сменная переходная втулка 4, на которой установлен пакет разжимных мембран 5. Лепестки мембран снабжены радиальными и торцевыми установочными поверхностями, а те, в свою очередь, с установочными поверхностями обрабатываемой детали.

Внутренняя поверхность переходной втулки сопряжена со ступицей сменной дисковой пяты 3, диск которой соприкасается с пакетом тарельчатых мембран. Разжим тарельчатых мембран, при установке и закреплении детали осуществляется с помощью гайки 1, которая при закручивании передает осевое вращение упору 2, который в свою очередь давит на мембраны 5, разжимая их.

При откручивании гайки 1 упор смещается в обратную сторону под усилием мембран, а сами мембраны сжимаются и отпуска-

ют деталь. Такое выполнение приспособления дает возможность обрабатывать детали с односторонним расположением обрабатываемой и установочной поверхности при точности центрования по диаметру 0,02...0,05 мм и по торцу 0,01...0,05 на 100 мм длины.

### **5.3. Разработка технологического процесса**

В ремонтном производстве процесс восстановления деталей подразделяется на следующие этапы: очистка и мойка деталей, дефектовка, выбор технологических баз, подготовка поверхности, подлежащей восстановлению, восстановление изношенных поверхностей и контроль качества восстановления. Указанные этапы включают в себя отдельные операции, которые являются важнейшими элементами технологического процесса. Рациональный выбор и построение операций предопределяет производительность, качество и себестоимость восстановления [109].

Конструктивные и технологические особенности деталей подшипниковых узлов опор качения определяют выбор и порядок технологических операций.

На основе анализа существующих прогрессивных технологий и проведенных предварительных опытов установлена следующая схема восстановления посадочных мест подшипниковых мест крышек генераторов:

1. Очистка и мойка деталей.

2. Дефектация деталей согласно техническим условиям на ремонт.

3. Термическая. Проводят с целью выгорания остатков смазки. Необходимость этой операции вызвана тем, что в порах восстанавливаемой поверхности остаются включения смазки. Во время оплавления порошкового материала эта смазка расширяется, выходит из пор и, попадая в зону раздела покрытие-подложка, значительно ухудшает адгезионный контакт между полимером и основой.

Другие способы подготовки поверхности (обезжиривание, травление, фосфатирование, пассивирование) не дали желаемых

результатов, особенно при восстановлении деталей из алюминиевых сплавов.

4. Предварительная механическая обработка изношенных поверхностей. Цель операции – снятие дефектного слоя и восстановление первоначальной формы восстанавливаемой поверхности. Эту операцию необходимо выполнять исходя из рекомендаций, приведенных в разделе 4, то есть посадочное отверстие необходимо расточить до полного устранения износа с шероховатостью  $Rz = 15...30$  мкм. Такую шероховатость можно получить получистовым растачиванием [110].

5. Нанесение и формирование покрытия – основная операция технологического процесса, от которой зависит качество восстановления.

На основе анализа результатов исследований, проведенных в предыдущих главах, принят способ напыления покрытий из порошкообразных композиций в совмещенном электростатическом и ультразвуковом поле. В качестве материала для покрытий определена порошкообразная композиция следующего состава:

- а) эпоксидный олигомер П-ЭП-219 – 32...40 %;
- б) стекольная мука – 9,8...11,6 %;
- в) порошкообразный полиамид 12 – остальное.

Размеры частиц 80-200 мкм.

Анализ результатов исследований, проведенных в разделах 3 и 4, позволил разработать рекомендации по выбору технологических режимов нанесения и формирования покрытий и параметров УЗП. Эти режимы были опробованы в производственных условиях и откорректированы с учетом специфических особенностей производственной технологии. Следует отметить, что приведенные режимы являются ориентировочными и в каждом конкретном случае требуют индивидуальной корректировки. Вызвано это тем, что пленкообразование зависит от многочисленных факторов, которые в производственных условиях сложно учитывать, как в расчетах, так и в практических рекомендациях [111]. К таким факторам относятся: размеры и конфигурация деталей, толщина покрытия, теплопроводность детали, вид нагрева, отношение массы детали к покрываемой поверхности, дисперси-

онный состав порошка, влажность и заряд порошка, количество наносимых слоев покрытий и др.

Технологические режимы формирования покрытий из полимерных композиций и параметры УЗК приведены в таблице 5.1. Для более полной реализации возможностей предлагаемой композиции в каждом случае необходимо стремиться к формированию покрытий при возможно более низких температурах с учетом получения минимальной термоокислительной деструкции.

Таблица 5.1

**Технологические режимы нанесения и формирования покрытий из порошкообразной композиции в совмещенном электростатическом и ультразвуковом поле**

№ п/п	Наименование показателя	Единицы измерения	Значения
1	Напряжение на электродной сетке	кВт	40-60
2	Давление воздуха в воздушной камере	МПа	0,03-0,08
3	Продолжительность напыления	с	15-60
4	Температура формирования покрытия	°С	200-220
5	Продолжительность формирования покрытия	мин	16-25
6	Частота УЗК	кГц	18-22
7	Амплитуда УЗК	мкм	8-13

6. Финишная механическая обработка выполняется с целью придания восстановленной поверхности необходимой шероховатости и размеров, которые должны обеспечить оптимальные условия контактирования подшипника качения и корпусной детали. В качестве финишной обработки применяется тонкое растачивание, которое проводится на режимах резания цветных металлов, что не приводит к изменению структуры полимера и не влияет на качество поверхности. При этом посадочное место подшипникового узла необходимо обработать с полем допуска N7 или P7 и шероховатостью  $Ra = 2,5 \dots 0,63$  мкм и  $t_{c0} \geq 25$  %.

7. Контрольная. При этой операции необходимо измерить размеры и шероховатость посадочного места подшипникового узла, отклонение от соосности посадочного места и замковой поверхности, проверить качество покрытий.

Схема технологического процесса представлена на рис. 5.5.

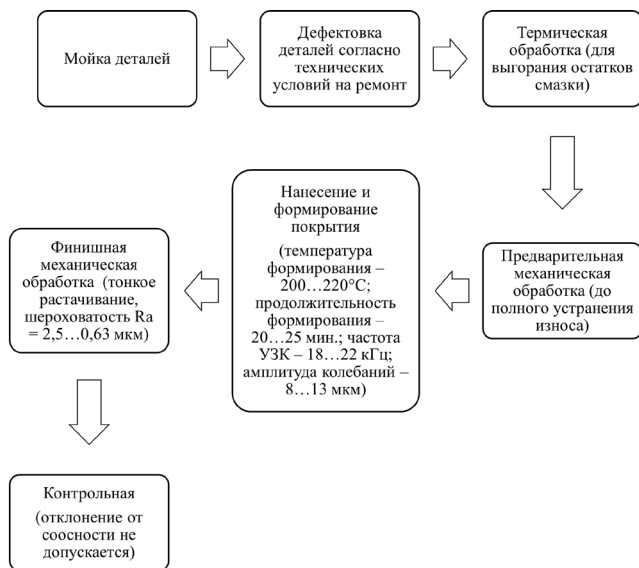


Рис. 5.5. Схема технологического процесса восстановления изношенных мест подшипниковых узлов

Типовая маршрутная карта на восстановление изношенных посадочных мест деталей типа крышек генераторов приведена в приложении Б.

## 5.4. Эксплуатационная проверка восстановленных деталей и внедрение технологии в производство

Эксплуатационную проверку проводили на предприятиях транспортной отрасли Приднестровья. Проверке подвергали генераторы с восстановленными крышками генераторов автомобилей.

Генераторы с восстановленными крышками устанавливали на автомобили, эксплуатируемые в различных условиях. Продолжительность эксплуатации определяли по показателям одометра при выпуске и возврате автомобилей с линии. При этом учитыва-



ли время простоев, связанных с проведением назначенных технических обслуживаний и ремонтов.

Для получения сравнительных данных генераторы автомобилей были укомплектованы деталями, восстановленными по разработанной технологии и новыми, выпускаемыми серийно промышленностью, такой подход связан с тем, что на территории Приднестровья внедренной технологии восстановления крышек генераторов не применяется.

Испытуемые генераторы разбирали после первого года эксплуатации. Во время разборки изучали состояние восстановленных посадочных поверхностей экспериментальных деталей и в случае соответствия техническим требованиям на ремонт использовали для повторной укомплектовки испытуемых объектов.

Детали, не соответствующие техническим условиям, заменяли аналогичными, а учет времени производили с момента замены.

Результаты эксплуатационных испытаний, проводимых на подвижном составе предприятий ОАО «Бендерская АК-2836» и ЗАО «АТП-3» города Бендеры, показали, что прогнозируемый межремонтный ресурс восстановленных по предлагаемой технологии крышек генераторов автомобилей примерно равен нормативному межремонтному ресурсу новой детали (прил. В).

Предлагаемая технология позволяет производить многократный демонтаж и монтаж подшипниковых узлов без существенного изменения геометрии восстановленного посадочного места.

Кроме этого, можно отметить, что детали, восстановленные герметиками и эпоксидными композициями, после первого демонтажа не подлежат дальнейшему использованию без повторного восстановления посадочных поверхностей. Это вызвано тем, что во время демонтажа слой герметика или эпоксидной композиции разрушается или имеет значительные деформации, вызванные воздействием различных эксплуатационных нагрузок.

Таким образом, стендовая и эксплуатационная проверка сопряжений, восстановленных предлагаемой технологией полимерными покрытиями, подтвердила их высокую долговечность. Предлагаемая технология внедрена на предприятии ОАО «Бендерский автосборочный завод» (прил. Г).

Анализ результатов производственных испытаний показал, что детали, восстановленные предложенной технологией с применением разработанной композиции, обладают высоким качеством и большей долговечностью, чем новые. Исследования показали, что крышки генераторов автомобилей, восстановленные покрытиями из предложенной порошкообразной композиции, можно использовать после второго и третьего ремонта без их восстановления.

По предложенной технологии для ряда предприятий транспортной отрасли города Бендеры восстановлены посадочные поверхности под подшипники крышек генераторов.

### **5.5. Разработка технологического процесса восстановления посадочных мест под подшипники картера коробки передач автомобиля КамАЗ**

Разработанная технология восстановления посадочных мест под опорные подшипники картера коробки передач автомобиля КамАЗ с использованием нового способа показана в прил. В.

В технологию восстановления входят следующие операции:

1. Моечная – предназначена для очистки от остатков смазочных материалов и продуктов износа.

2. Дефектовочная – предназначена для оценки состояния износа и внешнего состояния картера коробки передач. Сколы, трещины в районе посадочных мест под подшипники не допускаются.

3. Термическая – предназначена для удаления смазочных материалов с микротрещин и пор посадочных мест под подшипники, с целью улучшения адгезии ПКМ с основой материала.

4. Расточная – предназначена для подготовки поверхности под подшипник необходимой шероховатости, с соблюдением технических требований и устранения дефекта формы при износе.

5. Обезжиривание – предназначена для подготовки поверхности под подшипник для полимерного покрытия, с целью лучшей адгезии с ПКМ с основой.

6. Полимерная – предназначена для формирования и нанесения ПКМ на восстанавливаемую поверхность под опорный подшипник, толщину покрытия выполнить с учетом припуска на последующую механическую обработку.

7. Расточная – предназначена для расточки восстановленной поверхности до номинальных размеров, с учетом технических требований.

8. Контрольная – предназначена для контроля размеров, шероховатости и других дефектов, которые могут возникнуть при восстановлении.

Разработанная технология может быть внедрена на предприятиях Приднестровья. Оборудование, используемое в технологическом процессе (прил. В) кроме оборудования для нанесения ПКМ, так же используется и других марок с учетом соблюдения технических требований и технических условий для детали.

## **5.6. Расчет экономической эффективности внедрения разработанного технологического процесса в производство**

Как говорилось выше, на ремонтных предприятиях Приднестровья отсутствует технология восстановления посадочных мест подшипников крышек генераторов автомобилей, что приводит к замене изношенной детали.

Экономическую эффективность определяют в сравнении со стоимостью новой детали на партии восстановленных деталей  $n=50$  шт [112].

$$\mathcal{E} = \left( C_n - C_b \frac{P_2}{P_1} \right) N_{\text{рем}}, \quad (5.1)$$

где  $C_b$  – себестоимость восстановления детали по разработанному методу, у.е.;  $C_n$  – стоимость новой детали;  $N_{\text{рем}}$  – количество ремонтов в год;  $P_1, P_2$  – средние межремонтные ресурсы деталей, восстановленных разработанным способом и новых деталей.

Прогнозируемый межремонтный ресурс, отремонтированных по предлагаемой технологии деталей с применением разра-

ботанной ремонтной композиции крышек генераторов, примерно равен нормативному ресурсу новой детали, т. е.  $P_1 = P_2$ .

Стоимость восстановления подшипникового узла крышки генератора находим по формуле [113]:

$$C_{\text{восст}} = C_{\text{п}} + H, \quad (5.2)$$

где:  $C_{\text{п}}$  – себестоимость восстановления подшипникового узла крышки генератора, у.е.;  $H - 0,25C_{\text{п}}$  – планируемая прибыль предприятия, у.е.

$$C_{\text{п}} = C_{\text{пр.н}} + C_{\text{р.м}} + C_{\text{оп}} + C_{\text{ох}} + C_{\text{вп}}, \quad (5.3)$$

где:  $C_{\text{пр.н}}$  – заработная плата рабочих, занятых восстановлением подшипникового узла крышки генератора, у.е.;  $C_{\text{оп}}$ ,  $C_{\text{ох}}$  и  $C_{\text{вп}}$  – соответственно, общепроизводственные, общехозяйственные и внепроизводственные накладные расходы, у.е.;  $C_{\text{р.м}}$  – стоимость составляющих элементов ремонтной композиции, у.е.

Зарплата рабочих  $C_{\text{пр.н}}$ , занятых восстановлением подшипникового узла крышки генератора, складывается из основной  $C_{\text{пр}}$ , дополнительной  $C_{\text{доп}}$  и начислений по социальному страхованию  $C_{\text{соц}}$ , т.е.

$$C_{\text{пр.н}} = C_{\text{пр}} + C_{\text{доп}} + C_{\text{соц}}. \quad (5.4)$$

Основную заработную плату рабочих, занятых восстановлением подшипникового узла крышки генератора, вычисляем на основании формулы:

$$C_{\text{пр}} = 0,01T_{\text{ш.к}} C_{\text{ч}} K_{\text{д}}, \quad (5.5)$$

где:  $C_{\text{ч}}$  – ставка рабочих, занятых восстановлением подшипникового узла крышки генератора, отчисляемая по среднему разряду, у.е./ч;  $T_{\text{ш.к}}$  – штучно-калькуляционное время, ч;  $K_{\text{д}} = 1,025 \dots 1,03$  – коэффициент, учитывающий доплаты к основной заработной плате [114].

Штучно-калькуляционное время  $T_{\text{ш.к}}$  определяли по формуле:

$$T_{\text{ш.к}} = T_{\text{п.з}}/n + T_{\text{шт}}, \quad (5.6)$$

где:  $T_{шт}$  – штучное время, т.е. время на выполнение всех операций процесса восстановления, ч.;  $n$  – количество деталей в партии, шт.;  $T_{п.з}$  – подготовительно-заключительное время, определяется суммированием  $t_{п.з}$  по всем операциям маршрутной карты, ч;  $T_{шт.к} = 2,5/50 + 3,56 = 3,61$  ч;  $C_{пр} = 0,01 \cdot 3,61 \cdot 24 \cdot 1,03 = 0,9$  у.е.<sup>3</sup>

Дополнительная заработная плата производственных рабочих составляет 5...12 % от основной:  $C_{доп} = 0,12 \cdot 0,9 = 0,11$  у.е.

Отчисления на социальное страхование определяем из выражения:

$$C_{соц} = R_{соц} (C_{пр} + C_{доп}) / 100, \quad (5.7)$$

где:  $R_{соц} = 25\%$  – процент отчислений на социальное страхование,  $C_{соц} = 25 \cdot (0,9 + 0,11) / 100 = 0,25$  у.е.;  $C_{пр.н} = 0,9 + 0,11 + 0,25 = 1,26$  у.е.

Удельную стоимость ремонтных материалов определяем по формуле:

$$C_m = g_i \Pi_i, \quad (5.8)$$

где:  $g_i$  – масса материала, кг;  $\Pi_i$  – цена материала у.е.

$$C_{р.м} = 035 \cdot 60,3 + 0,1 \cdot 300 + 0,55 \cdot 364,5 = 251,6 \text{ у.е.}$$

Стоимость 1 кг композиции составила 251,6 у.е., тогда стоимость восстановления одной детали при условии потребности в 0,015 кг композиции составит  $251,6 \cdot 0,015 \approx 3,8$  у.е.

Общехозяйственные, общепроизводственные и внепроизводственные накладные расходы на восстановление подшипникового узла определим согласно:

$$C_{оп} = C_{пр} R_{оп} / 100 \quad (5.9)$$

$$C_{ок} = C_{пр} R_{ок} / 100, \quad (5.10)$$

$$C_{вп} = C_{пр} R_{вп} / 100, \quad (5.11)$$

где:  $R_{оп}$ ,  $R_{ок}$  и  $R_{вп}$  – соответственно, процент общепроизводственных, общехозяйственных и внепроизводственных накладных расходов принят согласно нормативных данных ОАО «Бендерский автосборочный завод»:  $R_{оп} = 12,5\%$ ;  $R_{ок} = 187\%$ ;  $R_{вп} = 0,8\%$ .

<sup>3</sup> За одну условную единицу принят один рубль Приднестровья, на момент расчета 1 рубль Приднестровья = 0,2205 рубля РФ

$$C_{\text{ок}} = 0,9 \cdot 12,5 / 100 = 0,1 \text{ у.е.}$$

$$C_{\text{оп}} = 0,9 \cdot 187 / 100 = 1,7 \text{ у.е.}$$

$$C_{\text{вп}} = 0,9 \cdot 0,8 / 100 = 0,007 \text{ у.е.}$$

Тогда полная себестоимость восстановления детали составит:

$$C_{\text{п}} = 1,26 + 3,8 + 1,7 + 0,1 + 0,007 = 6,87 \text{ у.е.}$$

Определяем стоимость восстановления детали:

$$C_{\text{в}} = 6,87 + 0,25 \cdot 6,87 = 8,6 \text{ у.е.}$$

С учетом проведенных расчетов экономическая эффективность внедрения новой технологии в производство на программу ремонта 50 крышек генераторов равна:

$$\text{Э} = (230 - 8,6) \cdot 50 = 11070 \text{ у.е.}$$

Экономическая эффективность внедренной технологии по результатам восстановления партии в 50 изношенных деталей составила 11070 у.е., что эквивалентно 50204 рублям РФ.

## ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Проведенный анализ литературных источников, анализ ремонтного фонда Приднестровья и рассмотрение теоретических аспектов позволили разработать методику проведения исследований и технологический процесс восстановления изношенных посадочных мест подшипниковых узлов автомобилей с применение нового полимерного композиционного материала, поставить цели и основные задачи работы.

На основе проведенных теоретических, лабораторных и эксплуатационных исследований были получены следующие результаты:

1. Разработаны математические модели: развития усталостных трещин в стареющих материалах деталей автомобилей; развития усталостных макроскопических трещин; развития усталостных трещин с немалой зоной предразрушения – справедливость которых подтверждена экспериментально.

2. Произведена оптимизация полимерного композиционного материала для восстановления посадочных мест под подшипники качения автомобилей методом вибровихревого электростатического напыления покрытий на изношенные поверхности с оптимальным соотношением компонентов:

- а) эпоксидный олигомер П-ЭП-219 – 32–40 %;
- б) полиамид 12 (12АП-Н) – остальное;
- в) стекольная мука – 9,8-11,6 %.

3. Теоретически изучена и экспериментально подтверждена возможность повышения качества и стабильности физико-механических свойств полимерных покрытий воздействием на подложку во время формирования покрытий ультразвуком, что позволило разработать способ получения полимерных покрытий из порошкообразных композиций путем их нанесения и формирования в совмещенном электростатическом и ультразвуковом поле.

4. Определены оптимальные технологические режимы формирования покрытий из разработанной композиции в совместном электростатическом и ультразвуковом поле, обеспечива-

ющие высокую адгезию и прочность соединения: температура формования  $T_{\phi} = 200 \dots 220$  °С; продолжительность формирования  $\tau = 20 \dots 25$  мин.; частота УЗК 18...22 кГц; амплитуда торца волновода 8...13 мкм.

5. Экспериментально показано, что адгезионная прочность полимерных покрытий зависит от материала подложки и состояния покрываемой поверхности. Максимальная адгезионная прочность достигается при  $R_z = 15 \dots 30$  мкм. При этом изменение адгезионной прочности от шероховатости менее зависимо для покрытий, получаемых в УЗП.

6. Установлено, что большей адгезионной прочностью обладают покрытия, сформированные на фосфатированных поверхностях при воздействии УЗП (на стальной подложке – около 35 МПа, подложки из АЛ4 – около 28 МПа). Поэтому, при восстановлении деталей автомобилей, к которым предъявляются высокие требования к адгезионной прочности, покрытия следует формировать в УЗП, а когда эти требования менее жесткие – покрытия можно формировать без УЗП, но с предварительным фосфатированием покрываемой поверхности.

7. Определены поле допуска и шероховатость посадочных поверхностей, восстановленных разработанной композицией, из условий обеспечения наивысшей долговечности и наибольшей прочности сцепления. Рекомендуется посадка N7 для деталей, подлежащих однократной сборке, и P7 для деталей, подлежащих многократной сборке, шероховатость покрытия  $R_a = 2,5 \dots 0,63$  мкм и  $t_{сб} \geq 25$  %.

8. Установлено, что предложенный состав композиции, нанесенный при оптимальных условиях на изношенные посадочные места подшипниковых узлов автомобилей, позволяет производить многократный монтаж и демонтаж подшипникового узла и эксплуатировать его при значительных нагрузках (до 7 кН).

9. Разработан технологический процесс восстановления изношенных мест подшипниковых узлов крышек генераторов автомобилей с помощью рекомендуемого полимерного материала. Установлено, что оптимальная равномерность покрытия и достаточно высокая производительность процесса достигаются при прохождении порошкообразной композиции через демпфи-



рующее отверстие, имеющее в сечении форму, приближенную к гиперболоидной.

10. Разработаны рекомендации по использованию результатов научных исследований в производственных условиях. Осуществлено внедрение предложенного технологического процесса на предприятии ОАО «Бендерский автосборочный завод». Производственные испытания, проводимые на предприятиях ОАО «Бендерская АК-2836» и ЗАО «Автотранспортное предприятие №3» города Бендеры, показали целесообразность и высокую эффективность разработанного технологического процесса. Долговечность восстановленной детали по предлагаемой технологии сравнима с деталью, выпущенной серийно, а экономический эффект от внедрения технологического процесса по восстановлению партии (50 крышек генераторов) изношенных деталей на ОАО «Бендерский автосборочный завод» составил 11070 у.е., что эквивалентно 50204 рублям РФ.

## Список использованной литературы

1. Зорин, В. А. Повышение долговечности дорожно-строительных машин путём совершенствования системы технического обслуживания и ремонта : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. А. Зорин. – Москва, 1998. – 411 с. – Текст : непосредственный.
2. Котомчин, А.Н. К вопросу выбора способа восстановления деталей машин / А. Н. Котомчин, А. Ф. Синельников, Н. И. Корнейчук. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2020. – Т. 17. – № 1(71). – С. 84-97.
3. Гаджиев, А. А. Технологическое обеспечение долговечности подшипниковых узлов машин применением полимерных материалов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. А. Гаджиев. – Москва, 2006. 387 с. – Текст : непосредственный.
4. Голего, Н. Л. Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия / Н. Л. Голего. – Текст : непосредственный // Физико-химическая механика фреттинг-коррозии. – 1973. С. 4-5.
5. Голего Н. Фреттинг-коррозия металлов / Н. Голего, А. Я. Алябьев, В. В. Шевель. В.В. – Киев : Техника, 1974. – 270 с. – Текст : непосредственный.
6. Алябьев, А. Я. Сборник трудов : надежность и долговечность авиационных газотурбинных двигателей / А. Я. Алябьев, В. В. Шевеля, К. В. Маркевич, М. Н. Рожков. – Текст : непосредственный // Исследование основных стадий разрушения поверхности металла при фреттинг-коррозии. – Киев, 1971. Т. I. С. 45-50.
7. Уотерхауз, Р. Б. Фреттинг-коррозия / Р. Б. Уотерхауз. Литва : Машиностроение, 1976. – 271 с. – Текст : непосредственный.
8. Рябченков, А. В. Фреттинг-коррозия и защита металлов / А. В. Рябченков, О. Н. Муравкин. Москва, 1957. – Текст : непосредственный.
9. Waterhouse, R. V. Fretting letigue / R. V. Waterhouse. London: Applied sciect publ, 1981. 244 pp.
10. Оноприенко, В. П. Исследование влияния некоторых физико-механических и химических факторов на изнашивание металлов при фреттинг-коррозии : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. П. Оноприенко. – Киев, 1973. – 174 с. – Текст : непосредственный.
11. Щетинин, М. В. Восстановление неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники адгезивом : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / М. В. Щетинин. – Мичуринск, 2008. 146 с. – Текст : непосредственный.
12. Щербина, Д. А. Исследование структурно-энергитических особенностей изнашивания металлов при фреттинг-коррозии : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Д. А. Щербина. – Киев, 1975. – 248 с. – Текст : непосредственный.

13. Алябьев, А. Я. Надежность и долговечность авиационных газотурбинных двигателей / А. Я. Алябьев. – Текст : непосредственный // Фреттинг-коррозия металлов и ее структурно-энергетическое описание. – Киев, 1971. Т. I. С. 35-39. – Текст : непосредственный.

14. Кондрашин, С. И. Восстановление неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники анаэробными герметиками с дисперсными минеральными наполнителями : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / С. И. Кондрашин. – Мичуринск, 2009. – 119 с. – Текст : непосредственный.

15. Алябьев, А. Я. Надежность и долговечность авиационных газотурбинных двигателей / А. Я. Алябьев, К. А. Крылов, В. П. Оноприенко. – Текст : непосредственный // Влияние внешних факторов на фреттинг-коррозию армо-железа и стали. – Киев, 1971. Т. I. С. 51-55.

16. Белый, В. А. Трение и износ материалов на основе полимеров / В. А. Белый. – МН: Наука и техника, 1976. – 432 с. – Текст : непосредственный.

17. Курчаткин, В. В. Восстановление посадочных мест подшипников полимерными материалами / В. В. Курчаткин. – Москва : Высшая школа, 1983. – 80 с. – Текст : непосредственный.

18. Масино, М. А. Исследование износов и методика определения коэффициентов восстановления корпусных деталей автомобилей / М. А. Масино. – Текст : непосредственный // Автомобильная промышленность. – Москва, 1973. № 8. С. 19-22.

19. Шерстобитов, В. Д. Повышение долговечности коробок передач автомобилей / В. Д. Шерстобитов. – Киров, 1983. – 163 с. – Текст : непосредственный.

20. Курчаткин, В. В. Восстановление посадок подшипников качения сельскохозяйственной техники полимерными материалами / В. В. Курчаткин. – Москва, 1989. – 407 с. – Текст : непосредственный.

21. Ли, Р. И. Восстановление неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники полимерными материалами : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Р. И. Ли. – Москва, 2001. – 340 с. – Текст : непосредственный.

22. Башкирцев, В. Н. Восстановление деталей машин и оборудования адгезивами : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / В. Н. Башкирцев. – Москва, 2004. – 397 с. – Текст : непосредственный.

23. Дмитриев, А. Д. Исследование работоспособности неподвижных соединений, восстановленных при помощи эпоксидных смол, модифицированных алифатической смолой ТЭГ-1: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. Д. Дмитриев. – Москва, 1970. – 137 с. – Текст : непосредственный.

24. Гаджиев, А. А. Исследование возможности повышения ресурса неподвижных соединений, восстановленных полимерными материалами, при ремонте сельскохозяйственной техники : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. А. Гаджиев. – Москва, 1978. – 154 с. – Текст : непосредственный.

25. Мотовилин, Г. В. Восстановление автомобильных деталей олигомерными композициями / Г. В. Мотовилин. – Москва: Транспорт, 1981. – 111 с. – Текст : непосредственный.

26. Шубин, А. Г. Повышение долговечности посадочных отверстий корпусных деталей сельскохозяйственной техники, восстановленных герметиком 6 Ф : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. Г. Шубин. – Москва, 1980. – 160 с. – Текст : непосредственный.

27. Карапатницкий, А. М. Анаэробные клеи в тракторных и сельхозмашинах / А. М. Карапатницкий, Е. В. Кузнецова, Б. И. Димент. – Текст : непосредственный // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1981. Т. 4. С. 32-35.

28. Димов, В. А. Применение анаэробных материалов при сборке подшипниковых соединений / В. А. Димов, А. А. Коновалов. – Текст : непосредственный // Техника в сельском хозяйстве. – 1981. Т. 4. – С. 52-54.

29. Юшков, В. В. Восстановление посадочных мест подшипников качения анаэробными материалами / В. В. Юшков. – Текст : непосредственный // Применение анаэробных материалов при сборке и ремонте автотранспортных средств : Информ. карта №218-87-85. – Устинов, 1985. С. 10-15.

30. Баскаков, В. Н. Долговечность неподвижных соединений сельскохозяйственных тракторов и пути ее повышения : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. Н. Баскаков. – Москва, 1986. – 201 с. – Текст : непосредственный.

31. Купреев, М. П. Повышение долговечности соединений подшипниковых узлов отремантированной сельскохозяйственной техники : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / М. П. Купреев. – Москва, 1988. – 212 с. – Текст : непосредственный.

32. Карапатницкий, А. М. Исследование несущей способности анаэробных клеев в цилиндрических соединениях / А. М. Карапатницкий. – Текст : непосредственный // тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1989. Т. 2. С. 27-30.

33. Аязбаев, М. Д. Долговечность неподвижных соединений типа вал-подшипник качения, восстановленных герметиком 6Ф в условиях сельскохозяйственных ремонтных предприятий : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / М. Д. Аязбаев. – Москва, 1984. – 193 с. – Текст : непосредственный.

34. Сиднина, Т. И. Восстановление посадок подшипников в щитах асинхронных электродвигателей на ремонтных предприятиях Госагропрома СССР : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Т. И. Сиднина. – Москва, 1986. – 159 с. – Текст : непосредственный.

35. Аль-Ассех Рашад Фахад. Обоснование выбора полимерного материала для восстановления и повышения долговечности неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Аль-Ассех Рашад Фахад. – Москва, 1989. – 181. – Текст : непосредственный.

36. Тоиров, И. Ж. Восстановление неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники анаэробными герметиками : диссертация

ция на соискание ученой степени кандидата технических наук / И. Ж. Тоиров. – Москва, 1990. – 172 с. – Текст : непосредственный.

37. Ли, Р. И. Неразрушающий контроль качества неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники, восстановленных анаэробными герметиками : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Р. И. Ли. – Москва, 1990. – 220 с. – Текст : непосредственный.

38. Селиверстов, Р. В. Повышение долговечности коренных подшипников двигателей нанесением на их гнезда полимерных покрытий при ремонте : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Р. В. Селиверстов. – Москва, 1993. – 192 с. – Текст : непосредственный.

39. Ли, Р. И. Восстановление деталей полимерными материалами при ремонте машин и оборудования: методические указания к лабораторной работе / Р. И. Ли. – Липецк, 2003. – Текст : непосредственный.

40. Бочаров, А. В. Повышение эффективности восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники адгезивами, наполненными дисперсными металлическими порошками : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. В. Бочаров. – Мичуринск, 2009. – 150 с. – Текст : непосредственный.

41. Сафонов, П. И. Выбор рационального способа восстановления сопряжения типа вал-подшипник качения агрегатов тракторов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / П. И. Сафонов. – Ленинград, 1973. – 202 с. – Текст : непосредственный.

42. Герметики. Анаэробные уплотняющие составы : Каталог. – Черкассы, 1980. – 20 с.

43. Герметики. Анаэробные уплотняющие составы : Каталог. – Черкассы, 1984. – 19 с.

44. Составы анаэробные уплотняющие (герметики): Клеи акриловые. – Черкассы, 1988. – 22 с.

45. Ибилдаев, Б. А. Долговечность подшипников качения сельскохозяйственной техники с посадками, восстановленными герметиком 6Ф : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Б. А. Ибилдаев. – Москва, 1986. – 159 с. – Текст : непосредственный.

46. Малюгин, В. А. Восстановление посадок подшипников качения автомобилей наноккомпозитом на основе анаэробного герметика АН-111 / В. А. Малюгин. – Мичуринск-наукоград, 2019. – 21 с. – Текст : непосредственный.

47. Зорин, В. А. Анализ долговечности посадочных мест подшипников, восстановленных полимерными материалами / В. А. Зорин, Е. Ю. Ляхов. – Инженер-строитель, 2018. – С. 337-342. – Текст : непосредственный.

48. Нарисова, И. Прочность полимерных материалов : перевод с японского / И. Нарисова. – Москва, 1987. – 398 с. – Текст : непосредственный.

49. Партон, В. З. Механика разрушения: от теории к практике / В. З. Партон. – Москва : Наука, 1990. – 240 с. – Текст : непосредственный.

50. Лихтон, П. П. Динамика системы цилиндр-оболочка / П. П. Лихтон. – Москва : Машиностроение, 1988. – 152 с. – Текст : непосредственный.

51. Баурова, Н. И. Методы оценки эксплуатационных свойств из полимерных композиционных материалов : методическое пособие / Н. И. Баурова, В. А. Зорин. – Москва : МАДИ, 2017. – 84 с. – Текст : непосредственный.

52. Баурова, Н. И. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин / Н. И. Баурова, В. А. Зорин. – Москва : МАДИ, 2016. – 264 с. – Текст : непосредственный.

53. Василенко, Ф. И. Восстановление изношенных деталей с.-х. машин полимерными композициями в ультразвуковом поле / Ф. И. Василенко. – Минск, 1985. – 24 с. – Текст : непосредственный.

54. Белый, В. А. Полимерные покрытия / В. А. Белый, В. А. Довгяло, О. Р. Юркевич. – Минск: Наука и техника, 1976. – 415 с. – Текст : непосредственный.

55. Тахавиев, М. С. Состояние и перспективы развития технологии нанесения полимерных порошковых покрытий / М. С. Тахавиев, Р. Р. Сайфуллин. – Текст : непосредственный // Международная молодежная научная конференция «XXII ТУПОЛЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ (школа молодых ученых)». – 2015. – С. 303-306.

56. Коляско, И. В. Исследование и разработка технологии восстановления деталей с.-х. техники полиамидными покрытиями : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / И. В. Коляско. – Москва, 1980. – 152 с. – Текст : непосредственный.

57. Берлин, А. А. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учебное пособие / А. А. Берлин. – Санкт-Петербург : ЦОП «Профессия», 2011. – 560 с. – Текст : непосредственный.

58. Яковлев, А. Д. Порошковые полимерные материалы и покрытия на их основе / А. Д. Яковлев, В. Ф. Дзор, В. И. Каплан. – Ленинград : Химия, 1979. – 312 с. – Текст : непосредственный.

59. Lyakhov, E. Yu. Mixture substantiation of the powder composition for bearing units seats restoring of rolling bearings/ E.Yu. Lyakhov, V.A. Zorin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1159.

60. Ляхов, Е. Ю. Исследование реологических свойств полимерных композиционных материалов методом конечных элементов / Е. Ю. Ляхов, В. А. Зорин // Вестник приднестровского университета. Серия: физико-математические и технические науки. – 2020. № 3 (66). – С. 114-119. – Текст : непосредственный.

61. Малышева, Г. В. Оценка температур фазовых переходов полимерных связующих методом дифференциально-сканирующей калориметрии / Г. В. Малышева, Э. Ш. Ахметова, Ю. Ю. Шимица. – Текст : непосредственный. // Клеи. Герметики. Технологии, № 6. – 2014. – С. 29-33.

62. Малышева, Г. В. Оптимизация выбора параметров, характеризующих состояние объекта, при решении задач надежности / Г. В. Малышева, И. К. Романова. – Текст : непосредственный // Ремонт, восстановление, модернизация. № 1. – 2015. – С. 29-33..

63. Юдин, Ю. В. Организация и математическое планирование эксперимента : учебное пособие / Ю. В. Юдин, М. В. Майсурадзе, М. В. Водолазский. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 124 с. – Текст : непосредственный.

64. Каминский, А. А. Развитие макротрещин в стареющих вязкоупруго-пластических телах под действием переменных нагрузок / А. А. Каминский, В. М. Пестриков. – Текст : непосредственный // Наука. Думка. – 1990. Т. 1. № 2. – С. 231-235.

65. Баурова, Н. И. Закономерности процессов разрушения композиционных материалов при продольном нагружении в зависимости от особенностей их структуры на микроуровне / Н. И. Баурова // Энциклопедия инженера механика. – Москва, 2012. – С. 35-41. – Текст : непосредственный.

66. Ляхов Е. Ю. Моделирование процессов усталостного разрушения поверхностей подшипниковых узлов автомобилей, восстановленных полимерными материалами / Е. Ю. Ляхов. – Текст : непосредственный // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), № 1 (60). – 2020. – С. 25-30.

67. Партон, В. З. Механика упруго-пластического разрушения / В. З. Партон, Е. М. Морозов. – Москва : Наука, 1985. – 504 с. – Текст : непосредственный.

68. Баурова, Н. И. Зорин В.А. Выбор моделей для оценки долговечности полимеров на различных масштабных уровнях / Н. И. Баурова, В. А. Зорин. – Текст : непосредственный // Теоретические основы химической технологии. – 2018. – № 5. – С. 567-572. – Текст : непосредственный.

69. Черепанов, Г. П. Механика хрупкого разрушения / Г. П. Черепанов. – Москва : Наука, 1974. – 640 с. – Текст : непосредственный.

70. Zorin, V.A., Baurova, N.I., Balovnev, V.I., Grib, V.V., Kosenko, E.A. Informational Model of State Change in a Mechanical System // Russian Engineering Research. August 2019. Vol. 39. No. 8. pp. 680–682.

71. Lugscheider, E., Bobzin, K., Beckers, M., Burckhardt, M. Gradierte Kohlenstoffschichten für Bauteile und Komponenten // In Tagungsband «GfT Jahrestagung 2001» Göttingen, Deutschland. 2001. pp. 23/1-23/10.

72. Дудчак, В. П. Теоретические предпосылки к исследованию адгезионной прочности полимерных композиционных покрытий с основой / В. П. Дудчак. – Текст : непосредственный // Электронная обработка материалов, Т. 39. – № 1. – 2003. – С. 27-30.

73. Баженов, С. Л. Полимерные композиционные материалы / С. Л. Баженов, А. А. Берлин. – Долгопрудный, 2010. – 352 с. – Текст : непосредственный.

74. Miyamoto Y. Development of functionally graded materials by HIP // Mat. Sci. Res. Int. 2000. No. 6. pp. 3-8.

75. Баженов, С. Л. Механика и технология композиционных материалов : научное издание / С. Л. Баженов. – Долгопрудный : Интеллект, 2014. – 328 с. – Текст : непосредственный.

76. Ковачич, Л. Склеивание металлов и пластмасс : перевод со словацкого / Л. Ковачин. – Москва : Химия, 1985. – 239 с. – Текст : непосредственный.

77. Кербер, М. Л. Полимерные композиционные материалы : структура, свойства, технология / М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, К. С. Головкин. – Санкт-Петербург : Профессия, 2008. – 560 с. – Текст : непосредственный.

78. Ляхов, Е. Ю. Повышение эффективности эксплуатации дорожных машин и автомобилей за счет применения ремонтных полимерных материалов /

Е. Ю. Ляхов, В. А. Зорин. – Текст : непосредственный // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2021. – № 1. – С. 39-43. – Текст : непосредственный.

79. Лесев, В. Н. Аналитические методы исследования кинетики процессов растекания капель / В. Н. Лесев. – Нальчик : Кабард.-Балкар. гос. ун-т им. Х. М. Бербекова, 2013. – 35 с. – Текст : непосредственный.

80. Khmelev, V.N. High Power Ultrasonic Oscillatory Systems // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007, 2007. pp. 293-298.

81. Негров, Д. А. Изменение механических и триботехнических свойств композита / Д. А. Негров, А. М. Шевчук, И. П. Микенин. – Текст : непосредственный // Новые материалы и технологии в машиностроении. – № 19. – 2014. – С. 82-86. – Текст : непосредственный.

82. Зорин, В. А. Гаджиев А. А. Повышение прочностных характеристик полимерных покрытий обработкой в ультразвуковом поле / В. А. Зорин, А. А. Гаджиев. – Текст : непосредственный // Автотранспортное предприятие. – № 3. – 2004. – С. 12-16. – Текст : непосредственный.

83. Машков, Ю. К. Самоорганизация и структурное модифицирование в металлополимерных трибосистемах / Ю. К. Машков, О. В. Кропотин, С. В. Шилько. – Омск: изд-во ОмГТУ, 2013. – 232 с. – Текст : непосредственный.

84. Ляхов, Е. Ю. Определение оптимальных технологических режимов нанесения ремонтных полимерных материалов / Е. Ю. Ляхов, В. А. Зорин, Ю. В. Штефан. – Текст : непосредственный // Техничко-технологические проблемы сервиса, № 4 (54). – 2020. – С. 15-25. – Текст : непосредственный.

85. Штефан, Ю. В. Методы выявления и оценки рисков в дорожном строительстве и машиностроении : монография / Ю. В. Штефан, В. А. Зорин. – Москва : МАДИ, 2017. – 136 с. – Текст : непосредственный.

86. Зорин, В. А. Надежность механических систем : учебник для вузов / В. А. Зорин. – Москва : ИНФРА-М, 2015. – 380 с. – Текст : непосредственный.

87. Косенко, Е. А. Природоподобные материалы и конструкции в машиностроении : монография / Е. А. Косенко, Н. И. Баурова, В. А. Зорин. – Москва : МАДИ, 2020. – 304 с. – Текст : непосредственный.

88. Мироненко, А. В. Повышение долговечности роликоподшипниковых узлов в корпусных деталях автомобилей, восстановленных композицией адгезива АН-110 / А. В. Мироненко. – Орел: Орлов. гос. ун-т им. И.С. Тургенева, 2017. – 22 с. – Текст : непосредственный.

89. Тихомиров, С. Г. Кинетика процесса термоокислительной деструкции полимеров: получение аналитической зависимости / С. Г. Тихомиров, И. А. Хаустов, А. П. Попов. – Текст : непосредственный // Международный научно-исследовательский журнал, № 10-2 (17), 2013. – С. 95-96.

90. Негров, Д. А. Изменение структуры полимерного композиционного материала под воздействием ультразвуковых колебаний / Д. А. Негров, В. Ю. Путинцев, А. Р. Мулюкова. – Текст : непосредственный // Техника и технологии машиностроения. – Омск, 2017. – С. 144-147.



91. Приходько, В. М. Физические основы ультразвуковой технологии при ремонте автотракторной техники / В. М. Приходько. – Москва : БРАНДЕС, 1996. – 125 с. – Текст : непосредственный.
92. Нелсон, У. Е. Технология пластмасс на основе полиамидов / У. Е. Нелсон. – Москва : Химия, 1979. – 256 с. – Текст : непосредственный.
93. Зорин, В. А. Анализ изменения состояния деталей машин, изготовленных с использованием полимерных композиционных материалов / В. А. Зорин, Е. А. Косенко. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – Москва, 2015. – С. 52-54. – Текст : непосредственный.
94. Зорин, В. А. Ремонт подъёмно-транспортных, строительных, дорожных машин и оборудования / В. А. Зорин, А. П. Павлов, А. Ф. Синельников. – Москва : Академия, 2021. – 336 с. – Текст : непосредственный.
95. Зорин, В. А. Основы работоспособности технических систем : учебник для ВУЗов / В. А. Зорин. – Москва : Академия, 2015. – 208 с. – Текст : непосредственный.
96. Холопов, Ю. В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов / Ю. В. Холопов. – Ленинград : Машиностроение, 1988. – 224 с. – Текст : непосредственный.
97. Баурова, Н. И. Механическая обработка деталей машин из полимерных композиционных материалов / Н. И. Баурова, К. А. Макаров. – Текст : непосредственный // Технология металлов, № 2. – 2017. – С. 15-19.
98. Гриневич, Д. В. Критерии разрушения полимерных композиционных материалов / Д. В. Гриневич, Н. О. Яковлев, А. В. Славин. – Текст : непосредственный // Труды ВИАМ, № 7 (79), – 2019. – С. 92-111.
99. R.N. Haward, R.J. Young. The physics of glassy polymers. 2nd ed. L: Chapman & Hall, 1997. 508 pp.
100. V. V. GribV. A. ZorinN. I. Baurova. Determination of the Resources of Machine Components Made of Polymeric Composite Materials on the Basis of Cumulative Evidence // Polymer Science, Series D. October 2018. Vol. 11. No. 4. pp. 431–435.
101. Hurlblut G.S., Jr. Dana's. Manual of Mineralogy. 21st ed. New York: John Wiley a, Sons, 1998.
102. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. В 2 т. Т. 1/ С. П. Кундас, В. Л. Ланин М. Д. Тявловский и др. Под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко. – Минск : Бестпринт, 2002.- 404 с. – Текст : непосредственный.
103. Баурова, Н. И. Диагностирование и ремонт машин с применением полимерных материалов: монография / Н. И. Баурова. – Москва : ТехПолиграф-Центр, 2008. – 280 с. – Текст : непосредственный.
104. Васильев, Б. С. Ремонт дорожных машин, автомобилей и тракторов / Б. С. Васильев. – Москва: Академия, 2019. – 509 с. – Текст : непосредственный.
105. Долгополов, Б. П. Технология машиностроения, производство и ремонт подъёмно-транспортных, строительных и дорожных машин : Учебник для студентов высших учебных заведений / Б. С. Долгополов, Г. Н. Доценко, В. А. Зорин. – Москва: Академия, 2010. – 576 с. – Текст : непосредственный.

106. Синельников, А. Ф. Основы технологии производства и ремонт автомобилей / А. Ф. Синельников. – Москва : Академия, 2011. – 320 с. – Текст : непосредственный.
107. Котин, А. В. Восстановление размерных цепей сборочных единиц с применением нежестких компенсаторов износа : диссертация на соискание степени доктора технических наук. – Саранск, 1997. – 359 с. – Текст : непосредственный.
108. Parameswaran, V., Shukla, A. Processing and characterization of a model functionally gradient material // Journal of Material Science. 2000. No. 35. pp. 21-29.
109. Шпилько, А. В. Экономическая эффективность механизации сельскохозяйственного производства / А. В. Шпилько, В. И. Драгайкин. – Москва : Российская академия с/х наук, 2001. – 346 с. – Текст : непосредственный.
110. Артюнова, Г. И. Экономическая теория: учебник / Г. И. Артюнова. – Москва: международные отношения, 2010. – 368 с. – Текст : непосредственный.
111. Самайлович, В. Г. Экономическая оценка вариантов технических решений / В. Г. Самайлович. – Москва: МАДИ, 1993. – 59 с. – Текст : непосредственный.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Матрица планирования, условия и результаты экспериментов.

№ опыта	Кодированные значения факторов				Натуральные значения факторов				Отклик: адгезионная прочность, МПа			
	Температура формирования, °С Продолжительность формирования, мин. Частота УЗК, кГц				Амплитуда УЗК, мин.							
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>					X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
1	1	1	1	1	250	25	25	17	17,6	18,3	17,9	17,90
2	1	1	1	-1	250	25	25	3	15,6	16,6	16,4	16,40
3	1	1	1	1	250	25	25	17	15,6	16,6	18,1	18,10
4	1	1	-1	-1	250	25	15	3	15,3	14,9	15,6	15,60
5	1	-1	1	1	250	5	25	17	14,6	14,2	13,9	13,90
6	1	-1	1	-1	250	5	25	3	11,6	11,8	12,6	12,60
7	1	-1	-1	1	250	5	15	17	13,4	12,9	13,6	13,60
8	1	-1	-1	-1	250	5	15	3	12,7	12,7	13,2	13,20
9	-1	1	-1	1	190	25	15	17	26,8	29,6	27,1	27,10
10	-1	1	1	-1	190	25	25	3	28,3	25,1	25,9	25,90
11	-1	1	-1	1	190	25	15	17	25,3	25,8	24,7	24,70
12	-1	1	-1	-1	190	25	15	3	23,8	24,9	24,6	24,60
13	-1	-1	1	1	190	5	25	17	10,5	13,4	12	11,60
14	-1	-1	1	-1	190	5	25	3	8,8	11,5	10,6	10,60
15	-1	-1	-1	1	190	5	15	17	14,3	13,8	14,6	14,60
16	-1	-1	-1	-1	190	5	15	3	11,3	12,6	11,9	11,90
17	1	0	0	0	190	15	20	10	21,5	21,1	20,8	20,80
18	-1	0	0	0	190	15	20	10	26,8	27,6	27,1	27,10
19	0	1	0	0	220	25	20	10	33,9	34,6	34,4	34,40
20	0	-1	0	0	220	5	20	10	28,3	28,9	27,5	27,50
21	0	0	1	0	220	15	25	10	31,6	32,3	31,8	31,80
22	0	0	-1	0	220	15	15	10	30	30,2	30,1	30,10

№ опыта	Кодированные значения факторов				Натуральные значения факторов				Отклик: адгезионная прочность, МПа			
	Температура формирования, °С				Амплитуда УЗК, мин.							
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>					X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
23	0	0	0	1	220	15	20	17	31,8	31,9	32,5	32,50
24	0	0	0	-1	220	15	20	3	29,5	30,8	29,8	29,80
25	0	-1	1	1	220	5	25	17	12,9	13,4	13,2	13,20
26	0	-1	-1	-1	220	5	15	3	11,9	12,9	12,8	12,80
27	0	1	-1	-1	220	25	15	3	29,1	28,6	28,9	28,90

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Маршрутная технология восстановления посадочных мест под подшипники качения крышек генераторов автомобилей и дорожно-строительных машин.

№ операции	Наименование операции	Оборудование	Содержание операции
1.	Моечная	Ультразвуковая ванна УЗВ-12/200 МП	Промыть деталь в 2–2,5% растворе МС-6 или МС-8
2.	Дефектовочная	–	Производить дефектовку согласно техническим условиям на ремонт
3.	Термическая	Термопечь	Нагреть деталь до температуры 150–200°С и выдержке при этой температуре 1,5–2 ч.
4.	Токарная	Токарно-винторезный станок 1К 62, приспособление для механической обработки	Расточить посадочное отверстие до полного установления износа с шероховатостью Rz 15–30 мкм.
5.	Нанесение покрытия	Нанесение для покрытий из порошкообразных композиций в совмещенном электростатическом и ультразвуковом поле	Наносить порошкообразную композицию на восстанавливаемые посадочные места с предварительной обработкой деталей УЗП: $\Phi = 18\text{--}22\text{ кГц}$ , $A = 8\text{...}13\text{ мкм}$ , напряжение на электродной сетке 40–60 кВ, давление воздуха в рабочей камере 0,02–0,08 МПа, продолжительность напыления 15–60 с.
6.	Формирование покрытия	Установка для формирования покрытий в ультразвуковом поле	Формирование покрытия в УЗП. Частота УЗК 18–22 кГц, амплитуда УЗК 8...13 мкм, температура формирования 200–220°С, продолжительность формирования 16–25 мин.

№ операции	Наименование операции	Оборудование	Содержание операции
7.	Токарная (тонкое растачивание)	Токарно-винторезный станок 1К 62	Расточить посадочное отверстие с шероховатостью Rz 2,5–0,63 мкм и $t_{\text{го}} \geq 25\%$
8.	Контрольная	–	Выполнить полный контроль детали согласно техническим условиям на ремонт

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Технологическая документация восстановления картера коробки передач автомобиля КамАЗ.

<b>77-38-101</b>	<b>Карпус КПП</b>			ГЧ 21ГОСТ 14.12-93 НВ 170.217			
Колодчан АН	Продвин	Эп. ВИП	Н. Кондр.				

1 \*Размеры для справок  
 2. Неисполнительность отб. 1 отнаследственно отб. 2, 3 и 4 не больше 0,02 мм  
 3. Неисполнительность отб. 1, 2, 3 и 4 отнаследственно А не больше 0,04 мм  
 4. Прочность сцепления нанесенного слоя на поверхностях отб. 1, 2, 3 и 4 не меньше 19 МПа  
 5. Допускается в нанесенном слое пары ш доклабы не больше 3 мм\* и не больше 10% от поверхности отб. 1, 2, 3 и 4 герметик АН-60.

Карта эскизов

КЭ	1
----	---

Длина	Ширина	Высота	Длина	Ширина	Высота	Длина	Ширина	Высота	Длина	Ширина	Высота	Длина	Ширина	Высота
Корпус КПП														
77-38-101														
СЧ 21 ПОЛ 14.2-93 ИВ 170.217														
Котомин А.И.														
Проверил														
И.М.И.														
А.И.И.														
Б.И.И.														
К.И.И.														
Л.И.И.														
М.И.И.														
Н.И.И.														
О.И.И.														
П.И.И.														
Р.И.И.														
С.И.И.														
Т.И.И.														
У.И.И.														
Ф.И.И.														
Х.И.И.														
Ц.И.И.														
Ч.И.И.														
Ш.И.И.														
Щ.И.И.														
Ъ.И.И.														
Ы.И.И.														
Э.И.И.														
Ю.И.И.														
Я.И.И.														
005 Мясная														
А01														
Б02	Машина мясная 0М-9313 или цеховая	М	3	Т										
А03	010 Дефектовочная													
Б04	Стол для дефектации ОРГ-14-6801-90	Р	5	Н										
А05	015 Термическая													
Б06	Термопечь	Р	4	Т										
А07	020 Расточная													
Б08	Станок горизонтально-расточной 2М-114	Р	4	Т										
А09	025 Обезжиривание													
Б10	Верстак слесарный ОРГ-1468-01-090А	Р	4	Т										
А11	030 Полимерная													
Б12	Установка для фармирования покрытий в ультразвуковом поле													
Б3		Р	4	Н										
А14	035 Расточная													
Б15	Станок горизонтально-расточной 2М-114	Р	4	Т										
А16	040 Контрольная													
А17	Верстак слесарный ОРГ-1468-01-090А	Р	5	Н										
МК	Маршрутная карта													
2														

















Автом.																			
Взам.																			
Подп.																			
Рисовый подпись																			
И.контр.	Котомыч АН																		
Лист	77-38-101																		СЧ 21ГОСТ 412-93 НБ 170.217
Лист	Корпус КПИ																		035
А.Тех.	СЧ	СМ	СД	СР	СЛ	СЛ	СР	СЛ	СЛ	СЛ	СЛ	СЛ	СЛ	СЛ	СЛ	СЛ	СЛ	СЛ	СЛ
Б.	СМ	СМ	СМ	СМ	СМ	СМ	СМ	СМ	СМ	СМ	СМ	СМ	СМ	СМ	СМ	СМ	СМ	СМ	СМ
К.И.	Наименование детали с единицы измерения																		
01																			
А02	035 Расточная																		
Б03	Станок горизонтально-расточной 2М-114 Р 4 Т																		
Т 04	Диаметр 125-150 ГОСТ 868-82, шаг генциркуль ШЦ-II-250-0,05 ГОСТ 166-89																		
0 05	1. Установить деталь и закрепить																		
0 06	2. Расточить отверстие 1 до размера $\phi 136^{+0,04}$ мм и 2 до размера $\phi 134^{+0,04}$ мм s=0,1 мм/об, n=160 мин <sup>-1</sup> , i=2, t=0,1 мм																		
0 07	3. Расточить отверстие 3 до размера $\phi 145^{+0,04}$ мм и 4 до размера $\phi 143^{+0,04}$ мм s=0,1 мм/об, n=160 мин <sup>-1</sup> , i=2, t=0,1 мм																		
0 10	4. Снять деталь																		
11																			
12																			
13																			
14																			
15																			
16																			
17																			
OK	Расточная																		
	9																		





---

Научное издание

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОСАДОЧНЫХ МЕСТ  
ПОДШИПНИКОВ АВТОМОБИЛЕЙ  
С ПОМОЩЬЮ ПОЛИМЕРНЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Монография**

Компьютерная верстка А.А. Маракуца

ИЛ № 06150. Сер. АЮ от 21.02.2002.

Подписано в печать . Формат 60×84/8.

Усл. печ. л. 8,36. Заказ № 245. Электронное издание.

Изд-во Приднестр. ун-та. 3300, г. Тирасполь, ул. Мира, 18