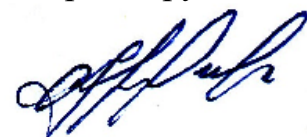


Министерство образования и науки Российской Федерации
Калужский филиал федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана)

На правах рукописи



Сорокина Ирина Игоревна

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ПРИ РЕМОНТЕ
ПОЛИМЕРНЫМИ КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

Специальность 05.20.03 – Технологии и средства технического обслуживания
в сельском хозяйстве

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор М.В. Астахов

Калуга 2017

Оглавление

Введение.....	6
1. Анализ состояния вопроса, задачи исследования	15
1.1. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) и их применение в сельхозмашиностроении	15
1.2. Соединение композитных деталей с металлическими частями конструкций	22
1.3. Способы восстановления тонкостенных листовых корпусных деталей	35
1.4. Выводы и задачи исследования	40
2. Теоретические предпосылки повышения эффективности эксплуатации и ремонта тонкостенных корпусных узлов сельскохозяйственной техники	42
2.1. Подбор компонентов ПКМ для восстановления тонколистовых корпусных деталей сельскохозяйственной техники	42
2.2. Теоретические аспекты проектирования и расчета соединения «сталь-композит».....	49
2.2.1. Проектирование соединения «сталь-композит»	49
2.2.2. Методика расчета соединения «сталь-композит».....	51
3. Методика экспериментальных исследований.....	69
3.1. Общая методика исследований	69
3.2. Методика изучения прочностных свойств ПКМ	71
3.3. Методика изучения микротвердости поверхностных фаз модифицированных ПКМ	81

3.4. Методика изучения влияния формы наконечника на вырыв крепежного элемента	84
3.5. Методика изучения геометрии соединения на вырыв крепежного элемента	88
3.6. Методика изучения влияния формы и расположения крепежного элемента в теле композита.....	92
3.7. Методика изучения влияния расположения плоскости лопатки крепежного элемента по отношению к сдвигающей нагрузке	96
4. Результаты и их анализ.....	102
4.1. Изучение модифицированных ПКМ	102
4.1.1.Изучение прочностных свойств модифицированных ПКМ	102
4.1.2.Изучение микротвердости поверхности модифицированных ПКМ.....	114
4.1.3.Результаты изучения модифицированных ПКМ.....	119
4.2. Изучение влияния формы крепежных элементов на прочность соединения «сталь-композит» под действием нормальной силы	120
4.2.1.Изучение влияния формы наконечника на вырыв крепежного элемента	120
4.2.2.Изучение влияния геометрии соединения на вырыв крепежного элемента ..	122
4.2.3.Результаты изучения прочности соединения под действием нормальной силы	127
4.3. Изучение влияния расположения крепежных элементов на прочность соединения «сталь-композит» под действием осевой силы	128
4.3.1.Изучение влияния формы и расположения крепежных элементов в теле ПКМ на срез.....	128

4.3.2. Изучение влияния расположения КЭ по отношению к сдвигающей нагрузке	130
4.3.3. Результаты изучения прочности соединения под действием осевой силы	137
4.4. Выводы	137
5. Уточнение методики расчета соединения «сталь-композит»	139
5.1. Исследование разрушения соединения «сталь-композит» под действием растягивающей силы.....	139
5.2. Проверка адекватности предложенной методики расчета.....	140
5.3. Выводы	143
6. Пример реализации результатов исследования и их технико-экономическая оценка	145
6.1. Технологические рекомендации	146
6.2. Проектирование и инженерный расчет соединения «конфузор – ремонтный фланец»	152
6.3. Экономический расчет	156
6.4. Утилизация отходов	161
6.5. Выводы	162
Заключение	164
Список сокращений и условных обозначений	166
Список литературы	167
Список иллюстративного материала.....	184

Приложение А (справочное) Состояние машинотракторного парка (МТП)	188
Приложение Б (справочное) Определение прочностных характеристик модифицированных полимерных композиционных материалов.....	191
Приложение В (справочное) Определение микротвердости поверхностных фаз модифицированных полимерных композиционных материалов.....	210
Приложение Г (справочное) Изучение влияния геометрии соединения на вырыв крепежного элемента	217
Приложение Д (справочное) Изучение влияния расположения крепежных элементов по отношению к сдвигающей нагрузке.....	218
Приложение Е (справочное)	228
Приложение Ж (справочное) Конструктивные особенности и технические характеристики кормоуборочного комбайна ПН-420 «Простор»	229
Приложение И (обязательное) Акты внедрения результатов диссертационного исследования.....	233

Введение

Актуальность темы исследования. В настоящее время поддержке аграрно-промышленного комплекса (АПК) в нашей стране уделяется большое внимание. Реализация Приоритетного национального проекта «Развитие АПК» [1]¹, а также Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации [2] напрямую зависят от работоспособности машинно-тракторного парка (МТП). Старение используемых машин и оборудования значительно опережает темпы технического перевооружения. По различным оценкам [3-6] (см. приложение А): сокращение МТП составило 60...80%; за пределами сроков амортизации работают 50...80% техники (амортизационный срок машины 8...10 лет); коэффициент обновления техники 1,1...6,2%² (оптимальный уровень 8...10%, что обусловлено средним сроком службы машины 10...12 лет)³. Вместе с тем стабильное увеличение стоимости природных ресурсов и их истощение, а также принятие законов по охране окружающей среды способствуют усилению вторичного рынка сельскохозяйственной техники, тем более что финансовые ресурсы большинства сельскохозяйственных товаропроизводителей ограничены.

В таких условиях для формирования оптимального МТП перспективным является развитие системы технического сервиса, а также модернизации техники, бывшей в эксплуатации. Особо следует отметить возможность ремонта и модернизации в условиях ремонтных мастерских машин, снятых с производства по разнообразным причинам, но эксплуатируемых в настоящее время. Примером может служить комплекс зерно- и кормоуборочной техники «Простор» (изготовитель ОАО «Тульский комбайновый завод» (ТукЗ)⁴).

¹ Начиная с 2008 года, приоритетный национальный проект «Развитие АПК» трансформировался в Государственную программу Развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013 - 2020 годы.

² Данные приведены по [4] для Центрального Федерального округа.

³ Статистические данные приведены в сравнении с 1990 г.

⁴ В середине 2000-ых годов ТукЗ неоднократно объявлял о реорганизации производства, в 2009 году на заводе была введена процедура конкурсного управления, а в 2010 суд признал банкротство завода. Обзор Тульской области (URL:

http://info.senatorvtule.ru/info/index.php?option=com_content&task=view&id=442&Itemid=66)

Согласно [4]: «Анализ направлений модернизации техники в России и за рубежом, опрос экспертов и мнений ученых и специалистов показывают, что наиболее перспективными из них являются повышение производительности машин, их надежности, экономичности и комфортности обслуживания. Повышение надежности модернизированных машин должно произойти за счет использования более совершенных конструкций агрегатов и новых материалов». Одними из таких материалов являются полимерные композиционные материалы (ПКМ), которые в последние годы находят все более широкое применение и открывают новые возможности в технологии не только ремонтных и восстановительных работ различного оборудования, но и во многих других областях.

Интересы государства в развитии данной научно-технической сферы производства ясно определены и неоднократно подчеркивались руководством страны [7-9]. Однако, анализ доступной информации дает серьезный повод говорить о кризисе в этой отрасли. В ходе первого заседания Межведомственного совета по вопросам развития разработки, производства и применения композиционных материалов в 2012 г. министр промышленности и торговли РФ подчеркнул, что объем мирового рынка композитов составляет 12 млн. тонн в год и не менее 700 млрд. евро в денежном выражении. В то время как объемы производства композитов в России исчисляются десятками тысяч тонн и составляют всего 0,3-0,5% от мирового объема (см. рис.1 [10]), в денежном выражении объем сектора гражданского потребления едва достигает 12 млрд. рублей в год [11].

Для создания и развития полноценной инновационной отрасли правительство РФ утвердило план мероприятий «Развитие отрасли производства композитных материалов». Ожидается, что к 2016 году объем производства композитов составит 50 млрд. руб., доля экспорта – 5%, а к 2020 году – 120 млрд. руб. и 10% соответственно [12].

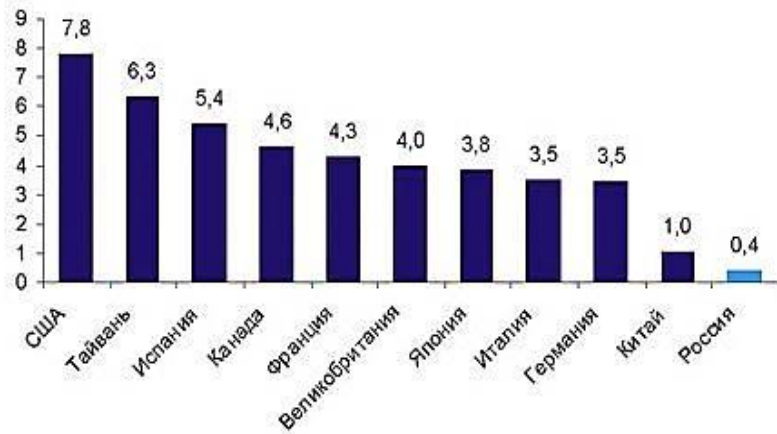


Рисунок 1 – Потребление ПКМ на душу населения⁵

В силу специфики технологий изготовления, ПКМ обладают большим потенциалом при создании материалов с нанодобавками, которые могут менять эксплуатационные характеристики материала, в зависимости от требований заказчика. Следует отметить, что исследования по разработке и производству композитов, и, прежде всего, модифицированных наноразмерными наполнителями, во всем мире отнесены к приоритетным научно-техническим направлениям и имеют критическую значимость для обеспечения конкурентоспособности экономик высокоразвитых стран [13-15]. Верификация использования полимерных нанокомпозитов в техническом сервисе находится на начальном этапе разработки, так как они возникли и применяются сравнительно недавно. Исследования в этой области основываются на теоретических положениях адгезии клеевых материалов с металлами и неметаллами, неоднозначно трактуемых разными авторами.

Поскольку полное изготовление или ремонт сельскохозяйственных машин на основе ПКМ невозможны на данном этапе развития инженерного дела, встает вопрос разработки совершенных и дешевых стыковочных узлов, соединяющих металлические (чаще всего стальные) детали машин с ремонтными, выполненными из ПКМ. Поэтому наряду с созданием новых узлов из ПКМ, актуальными являются разработка конструктивных решений соединений

⁵ Диаграмма приведена по состоянию на 2012г, в настоящее время эксперты отмечают увеличение влияния рынков Азии и Китая.

композитных деталей с металлическими частями конструкций в процессе модернизации или ремонта, а также создание достаточно простого, но эффективного метода расчета для оценки прочности рассматриваемых соединений.

Диссертация выполнена в продолжении работ по гранту 01.2003.313430 Министерства образования и науки РФ, в рамках научной работы КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана по теме «Разработка предложений по модернизации минисельхозтехники ОАО КАДВИ (Моноблока НМБ–1Н, навесных и прицепных орудий)» (№ регистрации Ж-К4-02-09).

Степень разработанности темы. В научной литературе исследование указанных проблем нашло свое отражение в многочисленных трудах российских и зарубежных ученых.

Изучению вопросов, связанных с инновационным развитием сельскохозяйственного производства в России, в частности с техническим обслуживанием, модернизацией и восстановлением МТП, а также решению задач повышения эффективности ремонта, в том числе и с применением ПКМ, посвящены работы Астанина В.К., Башкирцева В.И., Бобовича Б.Б., Быкова В.В., Голубева И.Г., Ежевского А.А., Жачкина С.Ю., Козыревой Л.В., Краснощекова Н.В., Курчаткина В.В., Ли Р.И., Лялякина В.П., Соловьева С.А., Тулинова А.Б., Федоренко В.Ф., Черепанова С.С., Черноиванова В.И. и др.

Большое значение в освящении проблем создания и применения ПКМ, в том числе и модифицированных нанодобавками, имеют фундаментальные работы Берлина А.А., Бородулина А.С., Васильева В.В., Жачкина С.Ю., Кербера М.Л., Козыревой Л.В., Курчаткина В.В., Ли Р.И., Любина Дж., Тарнопольского Ю.М. и др.

Вопросы конструкторско-технологических решений (КТР) соединений «сталь-композит» и методики их расчета рассмотрены в трудах Гайдачука В.Е., Ильиной А.Д., Карпова Я.С., Кривенды С.П., Кутьинова В.Ф., Сироткина О.С., Черевашенко А.С. и др., в зарубежной практике – в патентах аэрокосмической отрасли.

Вместе с тем, не в полном объеме изучены возможности применения ПКМ для повышения эффективности ремонта тонкостенных корпусных элементов сельскохозяйственной техники, в том числе и работающих в агрессивных средах. Кроме того, что цена корпусных деталей значительно влияет на цену машины в целом, корпусные детали определяют срок ее службы.

Недостаточно исследованы основные направления повышения эффективности соединений «сталь-композит», а существующие методики расчета чрезвычайно сложны для применения их на практике, тем более в условиях ремонтных предприятий.

Настоящая работа посвящена повышению эффективности соединений «сталь-композит» за счет применения нового крепежного элемента (КЭ) копьеобразной формы, созданию упрощенного проектировочного расчета указанных соединений, а также повышению износостойкости тонкостенных элементов конструкций путем ремонта сельскохозяйственной техники с применением ПКМ, в том числе кормоуборочной техники, работающих в агрессивных средах.

Цель исследования – повышения эффективности восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники при ремонте полимерными композиционными материалами (ПКМ) путем разработки соединения композитных и металлических частей конструкций и увеличения стойкости поверхности ПКМ к истиранию и действию агрессивных сред.

Исходя из указанной цели исследования, его основные **задачи**:

- выявить возможность увеличения износостойкости поверхности ламинатных полимерных композитов к истиранию под действием подвижных абразивных сред для повышения эффективности восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники;
- разработать соединение композитных и металлических частей конструкций сельскохозяйственной техники;
- разработать методику расчета на прочность соединения «сталь-композит» для использования при ремонте сельскохозяйственной техники;

– экспериментально обосновать рациональные параметры указанного соединения для восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники.

Объектом исследования являются соединения композитных и металлических частей конструкций сельскохозяйственной техники, ламинатные ПКМ на основе эпоксидных смол и стекловолокон.

Предметом исследования являются прочностные свойства указанных ПКМ и клеештифтовые соединения композитных и металлических частей конструкций сельскохозяйственной техники.

Научная новизна:

- конструктивное решение клеештифтового соединения композитных и металлических частей конструкций сельскохозяйственной техники, отличающееся формой крепежных элементов;
- усовершенствованная методика расчета на прочность предлагаемого соединения «сталь-композит» для использования при ремонте сельскохозяйственной техники, отличающаяся простотой и учетом особенностей предложенного конструктивного решения;
- аналитическая зависимость для определения нормальной выдергивающей силы с учетом особенностей предложенного соединения «сталь-композит» при ремонте сельскохозяйственной техники;
- рациональные параметры соединения «сталь-композит» для восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники, отличающиеся формой и расположением КЭ в теле ПКМ.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в теоретическом обосновании и разработке простого и эффективного метода проектирования и расчета соединения «сталь-композит». Предложенные технические решения позволяют повысить эффективность работ по восстановлению деталей сельскохозяйственной техники при помощи ПКМ, продлить срок службы сельскохозяйственных машин.

Методология и методы исследования. Теоретической и методологической основами исследования послужили труды отечественных и зарубежных ученых,

рекомендации научных учреждений по вопросам технического обслуживания и ремонта машинно-тракторного парка в сельском хозяйстве. В процессе исследования применялись статистический, экспериментальный, абстрактно-логический, расчетно-конструктивный, монографический методы; использованы основные законы и методы математической статистики, методы планирования эксперимента, аналитические и численные методы оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов машин, технологии машиностроения и материаловедения. В качестве исходной информации использованы нормативно-справочные материалы и рекомендации ряда научных учреждений. Для обработки статистических данных результатов экспериментов и проведения расчетов использовалось программное обеспечение: Minitab17; Maple15; MSC/NASTRAN; Microsoft Excel.

Положения, выносимые на защиту:

1. Рекомендации по увеличению износостойкости поверхности ламинатных полимерных композитов к истиранию под действием подвижных абразивных сред, позволяющие повысить эффективность послеремонтной эксплуатации деталей сельскохозяйственных машин, изготовленных из ПКМ.
2. Соединение композитных и металлических частей конструкций при помощи КЭ новой формы, позволяющее повысить эффективность восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники при ремонте.
3. Усовершенствованная методика расчета на прочность соединения «сталь-композит» для использования при ремонте сельскохозяйственной техники, позволяющая обосновать параметры разработанного соединения.
4. Зависимости усилия среза КЭ от коэффициента перенапряжения и коэффициента расположения КЭ в теле ПКМ, и нормальной силы, выдергивающей КЭ из тела ПКМ, от геометрии КЭ, позволяющие установить рациональные параметры соединения «сталь-композит» и оценить эффективность предложенных конструктивных решений при восстановлении корпусных деталей сельскохозяйственной техники.

Достоверность результатов основывается на значительном объеме теоретических и экспериментальных исследований с применением методов математического моделирования и статистической обработки полученных результатов с использованием вычислительной техники. С целью подтверждения достоверности предложенной методики для проектировочных расчетов первого приближения проведено сравнение результатов эксперимента и расчетных значений, которое показало ее адекватность. Выводы, изложенные в работе, обоснованы теоретически и отражают физическую сущность рассматриваемых процессов.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались:

- на Всероссийских научно-технических конференциях «Научно-технические технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе», г. Москва (2009, ... 2016 гг.);
- на VII Международной научно-технической конференции «Научные проблемы технического сервиса сельскохозяйственных машин», ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии, г. Москва 2011г;
- на Международной научно-технической конференции «Программа модернизации инженерно-технического обслуживания АПК как основа промышленной и образовательной политики», ГОСНИТИ, г. Москва 2014г;
- на XI Международной научно-технической конференции «Научные проблемы технического сервиса сельскохозяйственных машин», ГОСНИТИ, г. Москва 2015г.

Реализация результатов работы. Основные результаты исследования внедрены на предприятии по ремонту сельскохозяйственной техники ООО ТЦ «Агрит» – официальный дилер ООО «Комбайновый завод Ростсельмаш», на ремонтном предприятии ООО «ДизельПрофРемонт», в КФХ «Горячий ключ», на ОАО «Калужский турбинный завод», в Калужском филиале ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана при проведении учебной и научно-исследовательской работы для студентов, обучающихся по машиностроительным направлениям подготовки.

Личный вклад соискателя заключается в постановке задач исследования; выборе методов, разработке методики и плана проведения экспериментальных исследований; в статистической обработке эмпирических данных; анализе и обобщении результатов; в получении аналитической зависимости для определения нормальной выдерживающей силы, в определении и введении в классический инженерный расчет коэффициентов, учитывающих особенности предложенного соединения «сталь-композит»; разработке и проверке на адекватность математической модели; формулировании выводов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 научных работ, из них 11 научных статей в журналах из перечня ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести разделов, включающих 45 рисунков и 13 таблиц, заключения, списка литературы, включающего 142 наименования, из них 16 на иностранных языках, 8 приложений. Диссертация содержит 239 страниц, основной текст изложен на 186 страницах.

1. Анализ состояния вопроса, задачи исследования

Согласно статистике, приведенной ранее [3,4, 6], проблема старения МТП сегодня стоит настолько остро, что, по мнению Конкина Ю.А. [16], для абсолютного большинства сельхозтоваропроизводителей основным направлением поддержания техники в работоспособном состоянии является ее дорожающий ремонт и модернизация, при этом, большая доля рынка может быть покрыта восстановленными или новыми узлами, изъятими из списанных машин, что расширяет сферу технического сервиса. Мировой опыт свидетельствует, что будущее за компаниями, которые занимаются модернизацией изношенной техники (Голубев И.Г., Митракова В.Д.) [6]. В качестве позитивного примера рассмотрена компания «Caterpillar» (США), прибыль от капитального ремонта и модернизации в которой настолько значительна, что в 2005г. было создано специальное отделение, доходы которого за год составили около 1 млрд. долларов США.

Вопросам развития технического сервиса и модернизации сельскохозяйственной техники при ремонте в условиях Российской Федерации посвящено достаточно большое количество работ ФГБНУ ГОСНИТИ и ФГНУ «Росинформагротех», например, [4,5,17-21].

1.1. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) и их применение в сельхозмашиностроении

Материалы, наиболее часто используемые при конструировании, могут быть разделены на четыре основные группы: металлы, полимеры, композиты и керамика. Композиционные материалы применяются уже на протяжении многих веков, и не существует достоверных записей о том, когда люди впервые начали их использовать. Существенное увеличение применения композиционных материалов обусловлено, с одной стороны, исчерпыванием резервов традиционных конструкционных материалов, а с другой – колоссальными

возможностями, заложенными в самой идее создания композиции с заранее заданными свойствами. Очевидно, что за последние годы произошел качественный прорыв в создании материалов нового поколения, технический прогресс в большинстве отраслей машиностроения в значительной степени определяется полной или частичной заменой металлических конструкций на конструкции из композиционных материалов. В связи с чем, первоочередной задачей становится разработка композиционных материалов и конструкций из них, обеспечивающих конкурентоспособные ценовые и качественные показатели, а также технологии их изготовления [22].

«Одним из самых модных в наше время является выражение «композиционные материалы», содержащее в современной форме довольно древнюю и простую идею о том, что обобщенная работа разных материалов дает результат, равнозначный созданию нового материала, у которого свойства качественно и количественно отличаются от свойств каждого из его составляющих» Альберт Дитц⁶.

Композиционные материалы (КМ), согласно определению, данному Дж. Любиным [23, стр.18] – это материалы, состоящие из двух или более компонентов (отдельных волокон или других армирующих составляющих и связующей их матрицы) и обладающие специфическими свойствами, отличными от суммарных свойств их составляющих. Компоненты КМ не должны растворяться или иным способом поглощать друг друга. Свойства КМ нельзя определять только по свойствам компонентов, без учета их взаимодействия.

Одними из наиболее востребованных в настоящее время по праву считаются ПКМ, без которых невозможно представить современную авиацию, машиностроение, судостроение, ракетно-космическую технику, что обуславливается их свойствами. Так, согласно работе Берлина А.А. [25], применение ПКМ позволяет не только значительно снизить вес изделия, но и в разы уменьшить отходы при производстве, а существенное повышение характеристик, рассмотренное Кербером М.Л. [26, 27] достигается различными

⁶ Источник: [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://polycomposite.ru/> (20.12.2014), свободный.

видами армирующих элементов и/или наполнителей (в том числе и наноразмерными). Способы получения, свойства и области применения различных связующих, а также волокнистых наполнителей, изготовление деталей из КМ, принципы расчета и контроля подробно описаны в фундаментальных работах Дж. Любина [23, 24] и Васильева В.В. [28].

Согласно обзору, выполненному Байгильдиным Д.Ю. [29] появление новых КМ (металлополимерных ремонтных материалов) значительно расширяет возможности специалистов при выполнении ремонтных и восстановительных работ. Однако, приведенный обзор затрагивает только зарубежных производителей (Chester Molecular – Польша, UNIPER – Германия, BELZONA – США), в то время как события последнего времени показали, что достаточно стабильно развиваться могут предприятия на отечественных ресурсах, а кроме того импортозамещение является одной из самых актуальных задач на сегодня для страны в целом⁷. На основе исследований МГАУ им. В.П. Горячкина [30] (Курчаткин В.В., Кудрявцев В.И. и Башкирцев В.И.), можно сделать вывод, о возможности замены дорогих импортных материалов на отечественные аналоги, цена которых нередко на порядок ниже. Разработке отечественных ремонтных композиционных материалов и технологических методов ремонтных и восстановительных работ посвящены исследования Гончарова А.С., Тулинова А.Б. [31-33] и Волкова Г.М. [34].

Анализ материалов российских и международных конференций и выставок, проведенный Голубевым И.Г. и Быковым В.В. [35], позволяет заключить, что одно из стремительно прогрессирующих направлений в разработке КМ – это применение в качестве наполнителя наноматериалов, исследованию которых и посвящена работа. Согласно данным 2007г., приведенным в работе Федоренко В.Ф. [36], к основным областям применения нанотехнологий в АПК относятся технический сервис и сельскохозяйственное машиностроение.

⁷Источник: [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://importozamechenie.ru/tekst-poslaniya-prezidenta-federalnomu-sobraniyu-na-2015-god> <http://polycomposite.ru/> (20.06.2015), свободный.

Обзор отечественной и зарубежной литературы по методам модификации полимерных связующих нанодисперсными и нановолокнистыми наполнителями, проведенный Бородулиным А.С. [37], еще раз продемонстрировал, что разработка новых технологий введения наночастиц в ПКМ по-прежнему является актуальной задачей, поскольку от нее существенным образом зависят свойства конечного продукта. ПКМ функционального (специального) назначения, в том числе и полимерным наноматериалам (нанокомпозитам, наномембранам и нанопокрытиям) посвящена работа Михайлина Ю.А. [38].

Повышение стоимости стального проката, большие эксплуатационные затраты, сложность обслуживания и ремонта тяжелых машин, уплотнение ими пахотного слоя, пониженная трещиностойкость зон концентраций внутренних сил, а значит и создание причин для возрастания аварий и простоев в работе – это лишь неполный перечень проблем, возникающих с увеличением массы изделия, как отмечает в своей статье Астахов М.В. [39]. Применение ПКМ на основе стеклотканей и эпоксидных смол может стать решением обозначенной проблемы. Перевод тонкостенных конструкций сельскохозяйственных машин на изготовление из ПКМ, согласно [40] (Пузанов А.Г.), не только приводит к значительному снижению их массы, но и увеличивает химическую стойкость и долговечность последних. По данным [24] использование ПКМ позволяет резко уменьшить потери от коррозии, а также в 1,5 – 3,0 раза увеличить ресурс техники.

Достаточно умеренное использование новых материалов в современном сельхозмашиностроении можно объяснить, с точки зрения Астахова М.В. и Таганцева Т.В. [41], понятием безубыточности: при организации нового производства стоимость инновационных материалов и технологической оснастки не должна превышать расходов на традиционное изготовление деталей. Очевидно, что при таком подходе экономически целесообразным является применение ПКМ только в серийном производстве, хотя согласно [24] применение композитов в машинах и оборудовании позволяет снизить массу конструкции в 1,3 – 1,5 раза, материалоемкость в 1,6 – 3,5 раза, энергоемкость производства в 8 – 10 раз и трудоемкость изготовления в 1,5 – 3,0 раза.

Приблизительно с восьмидесятых годов двадцатого века ПКМ начинают применяться в сельскохозяйственном машиностроении, в частности, из них изготавливают банки туковысевающих аппаратов, силосные башни, элементы кузовов и бункеров [23, 41]. До недавнего времени в отечественном сельхозмашиностроении ПКМ использовали при изготовлении: полуприцепов-цистерн ГКБ-9653-01, ГКБ-9677-01, ОЗТП-9657, -9626; подкормщиков жидкими удобрениями ПЖУ-5 и ПЖУ-9 [41]; в технике для животноводства, кормоводства; в технике для обработки, хранения и переработке зерновых культур, где применение ПКМ, согласно работе Тухватуллина М.М. [42], способствует не только улучшению санитарно-гигиенических условий работы людей, но и обеспечивает сохранность зерна, снижение материально-технических затрат, увеличение срока службы оборудования (ковшей для норий, самотеков, силосов и др.). В исследовании Астахова М.В. [43] применение ПКМ позволило уменьшить массу борта прицепа ПСЕ-20 на 65-70%; в работе Бутовского М.Э. [44] предлагается изготавливать из стеклопластиков крупногабаритные детали трактора. В 2006-07 гг.⁸ специалисты ФГУП «НАМИ» на базе ПКМ разработали семейство малогабаритных транспортных средств с широкими функциональными возможностями, основные узлы и агрегаты были унифицированы с серийно производимыми в стране тракторами, грузовыми автомобилями и т.д. Такой подход к построению транспортного средства обеспечивает не только низкую себестоимость, но и ремонтпригодность даже в полевых условиях. ПКМ применялись для деталей интерьера и внешней формы (панелей капота, крыши, крыльев и др.) [45].

Очевидно, что использование ПКМ имеет положительные аспекты: позволяет уменьшить массу конструкции при сохранении или улучшении ее механических характеристик; антикоррозионные свойства этих материалов позволяют применять их там, где не выдерживают другие материалы (элементы животноводческих ферм; емкости для хранения минеральных удобрений,

⁸ в рамках выполнения Государственных контрактов с Министерством сельского хозяйства России №423/13 от 24.05.2006 и №761/13 от 23.07.2007

отходов, сельскохозяйственных заготовок; для изготовления кузовных деталей сельскохозяйственной техники; футеровочные листы для защиты от интенсивного износа технологического и транспортного оборудования при транспортировке зерновых культур;) и пр. Однако, в настоящее время в ремонтно-восстановительных работах ПКМ применяются в основном в виде многослойных полимерных и металло-полимерных покрытий.

Например, исследование [46] (Жачкин С.Ю.) посвящено восстановлению деталей сельхозмашин методом холодного нанесения гальванических композитных хромовых покрытий с заданными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками без предварительного выравнивания припуска и финишной механической обработки за счет созданного автором нового, запатентованного⁹ метода.

В работах Котина А.В., Сивцова В.Н., Конакова А.В. и Русяева А.В. [47, 48], рассмотрено восстановление изношенных посадочных отверстий корпусных деталей машин многослойными металло-полимерными покрытиями.

Применение ПКМ также считается перспективным направлением в повышении эффективности восстановления неподвижных соединений подшипников. Введение наполнителей в полимер позволяет значительно изменять потребительские свойства материала и, как правило, существенно уменьшать его стоимость. Исследования [49-51] (Козырева Л.В., Курчаткин В.В., Ли Р.И.) создают основу для разработки высокоэффективных технологических процессов восстановления, обеспечивающих не только проектирование подшипниковых узлов с заданными эксплуатационными характеристиками и долговечностью, но и снижение затрат на ремонт сельскохозяйственной техники. Например, в работах Ли Р.И. и Кирсанова Ф.А. [52, 53] рассматривается возможность увеличения эффективности восстановления посадочных отверстий корпусных деталей сельскохозяйственной техники эластомерами отечественного

⁹ Пат. 2224827 RU C2, МПК С 25 D 5/22. Способ гальвано-механического восстановления токопроводящих деталей/ С. Ю. Жачкин и др.
Пат. 2243297 RU C1, МПК 7 С 25 D 5/22. Способ гальвано-контактного изготовления абразивных лент/ С. Ю. Жачкин и др.

производства (лак эластомер Ф-40С, ОАО «НИИ пластических масс им. Г. С. Петрова» (г. Москва).

Ограничение в использовании новых полимерных материалов в современном машиностроении при изготовлении ремонтных крупногабаритных деталей можно объяснить еще и с точки зрения трудоемкости их утилизации или вторичной переработки в конце жизненного цикла изделия, а также отходов, возникающих в процессе производства. Особую сложность представляет переработка отходов стеклопластиков, состоящих из реактопластов и непрерывного стеклянного наполнителя (стекловолокон, стеклотканей). Вопросам их химической и механической переработки посвящен ряд работ отечественных и зарубежных авторов, в том числе и [54-58] (Крыжановский В.К., Бобович Б.Б., Перегуд Е.А, Ф. Ла Мантия).

При вторичной переработке отходов ПКМ возможно получение позитивного экономического эффекта, так как материалы используются повторно, что позволяет снизить потребление природных ресурсов, выбросы в окружающую среду и затраты энергии [58] (Ф. Ла Мантия). Однако, по мнению Naber B. W.¹⁰, «целесообразной, с экологической и экономической точек зрения, является вторичная переработка достаточно больших по объемам потоков однородных по составу и свободных от посторонних примесей отходов и бывших в использовании изделий» [59]. В связи с чем, несмотря на достаточно пристальное внимание к этому вопросу, как в Российской Федерации [60] (Нестеров С.П.), так и за рубежом [61,62] (Anna Hedlund-Åström, Gonzalo Martínez-Barrera и др.), до сих пор не существует широкодоступных методов ре-циклинга ПКМ.

Вывод: несмотря на огромный потенциал, применение ПКМ при восстановлении тонколистовых крупногабаритных деталей незначительно, что связано, по-видимому, с отсутствием рекомендации по их использованию, баз данных по изменению свойств модифицирующими добавками (в зависимости от требований потребителя), со сложностью утилизации и трудоемкостью методик проектирования.

¹⁰ Naber B. W. Weltenrettung durch Recycling von Kunststoffen // GAK 66 (2013) 12. S. 846–853.

1.2. Соединение композитных деталей с металлическими частями конструкций

В настоящее время отмечается резкое увеличение использования композитных материалов во всех отраслях. Многие работы, изданные в течение последних двух десятилетий, свидетельствуют о том, что прилагаются серьезные усилия не только для разработки системы анализа и проектирования самих композитных материалов, но и для разработки деталей и узлов из них [63] (Faruk Sen, Kemal Alda, s).

При создании любой новой конструкции или модернизации старой, тем более с применением новых материалов, наибольшие трудности связаны с созданием стыков и соединением деталей между собой, особенно соединение композитных и металлических частей конструкций. На сегодняшний день проблема создания и усовершенствования таких соединений является наиболее актуальной и активно разрабатывается не только в России, но и за рубежом, при этом изучением соединения «сталь-композит» традиционно занимались в рамках развития авиационной и аэрокосмической отраслей промышленности [64]. В связи с этим большинство работ, посвященных этому вопросу, изданы: на базе Национального аэрокосмического университета им. Н.Э. Жуковского «ХАИ», например, [65-66]; в Центральном аэрогидродинамическом институте им. Н.Э. Жуковского «ЦАГИ» [67-73]; в последнее время ряд исследований на эту тему проводился в Самарском государственном аэрокосмическом университете [74-75].

Соединения деталей из КМ могут быть разделены на: адгезионные (клеевые), соединения с механическим креплением (традиционно используемые для металлических конструкций), комбинированные (гибридные) и соединения с трансверсальными крепежными микроэлементами (клеештифтовые). Рассмотрим их основные достоинства и недостатки.

Технология адгезионного склеивания широко используется, в основном из-за ее низкой стоимости и достаточно высокой эффективности. По мнению

Карпова Я.С., Кривенды С.П. и Рябкова В.И. [65] в конструкциях из слоистых КМ адгезионные соединения являются самыми распространенными и реализуются обычным склеиванием, когда клеящим веществом является связующее или специальные клеевые препреги. Наибольшее распространение получили нахлесточные клеевые соединения. Достаточно подробно состояние исследований и КТР адгезионных соединений рассмотрены в работах [65] и [71-72] (Кутьинов В.Ф.).

Клеевые соединения дают значительное сокращение массы, по сравнению с механическим способом крепления, что, как подчеркивалось ранее, приводит к экономии топлива. Сопротивление усталости, а также равномерное распределение напряжений увеличивают несущую способность соединения. Тем не менее, клеевые соединения обычно не используются там, где требуется эффективная разборка и сборка. Они очень чувствительны к подготовке поверхности и к условиям окружающей среды, в частности влажности и коррозионной среде. Клеевые соединения невозможно проверить без сложных и, следовательно, дорогостоящих методов контроля, в связи с чем, обнаружение дефектов и повреждений становится сложной задачей [65], [76] (David S. Gonzalez). При этом клеевые соединения элементов конструкций значительной толщины обладают недостаточной несущей способностью [77] (Корженевский А.В.), а также малоэффективны в соединениях, работающих на отрыв [67] (Череващенко А.С.) и при динамических ударных нагрузках [76].

Наиболее часто используются соединения с механическим креплением. Крепеж (штифты, винты, болты) позволяет выполнять демонтаж и легкую сборку соединений, что важно для своевременного и экономически эффективного обслуживания и ремонта. Кроме того, такой вид крепежа нечувствителен к экологическим факторам, таким как тепло и влажность до тех пор, пока принимаются антикоррозионные профилактические меры. Основным недостатком такого соединения является наличие отверстий, что в случае волокнистых материалов, требует частичного удаления армирующих волокон, а это негативно влияет на их прочность. Независимо от используемого материала

отверстие является концентратором напряжений [63]. В случае болтовых соединений требуется так же периодическое техническое обслуживание из-за ослабления усилия затяжки, вызванного вибрациями [65,76]. В силу специфики КМ, механическое соединение связано с определенными трудностями из-за технологии сборки [70, 73] (Воробей В.В., Сироткин О.С.), [74-75] (Вашуков Ю.А.) с одной стороны, и отсутствия системы экспериментального обеспечения расчета на прочность и проектирования механических соединений [65-66, 68] (Василевский Е.Т., Двейрин А.З., Карпов Я.С., Кривенда С.П., Рябков В.И.), [70] (Ильина А.Д., Ильин Ю.С.) с другой.

Пристальное внимание уделяется в последнее десятилетие использованию комбинированных соединений (соединениям с дискретными связями). Эти соединения совмещают некоторые из положительных свойств механических и клеевых соединений, однако настолько мало изучены, что их эффективность трудно экспериментально измерить и научно предсказать. Из-за сложного взаимодействия между компонентами этого соединения и многочисленных условий, которые влияют на эти взаимодействия, невозможно смоделировать поведение соединения с достаточной степенью точности.

В работе [76] подробно исследованы механические свойства соединений внахлест «металл-композит» при статических и вибрационных нагрузках (рисунок 2) в зависимости от способа соединения (адгезионное, болтовое, комбинированное); скорости приложения нагрузки; геометрии (расположение отверстия под крепеж по отношению к краю детали); подготовки материала (перед склеиванием); вида материала и изменения температуры.

Исследования проводились на базе Инженерного центра по исследованию танковой и самоходной техники (TARDEC), США (Мичиган). Рассматривался случай, когда комбинированные соединения допустимы, например, если не требуется сборка/разборка соединения, а воздействие окружающей среды вводит ограничения в отношении типа используемого клея.

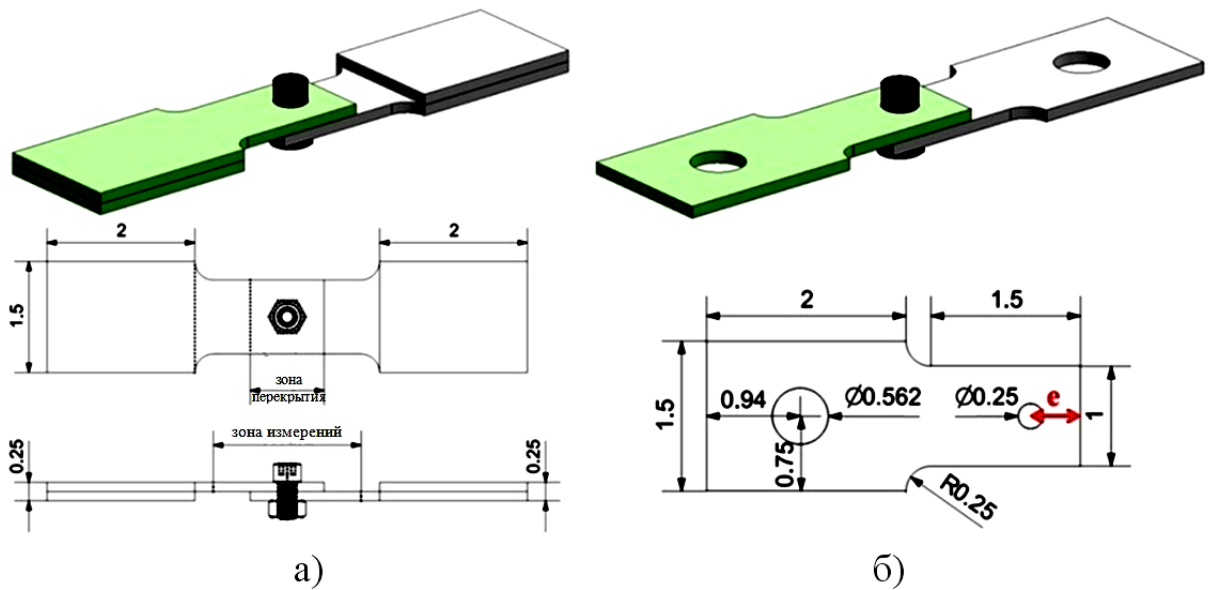


Рисунок 2 – Модели и схемы образцов соединения «металл-композит»

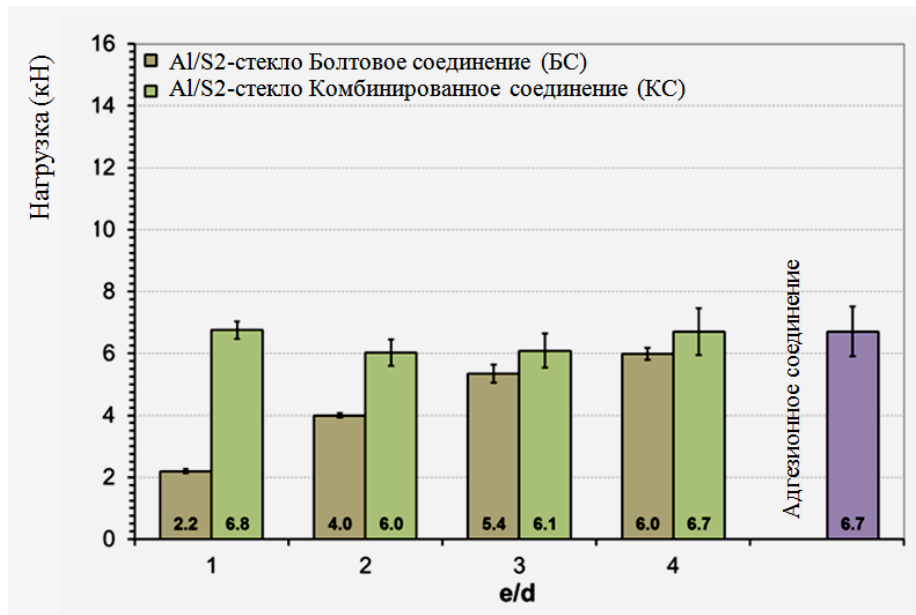
а) при статическом нагружении; б) при вибрационных нагрузках;

размеры приведены в дюймах¹¹

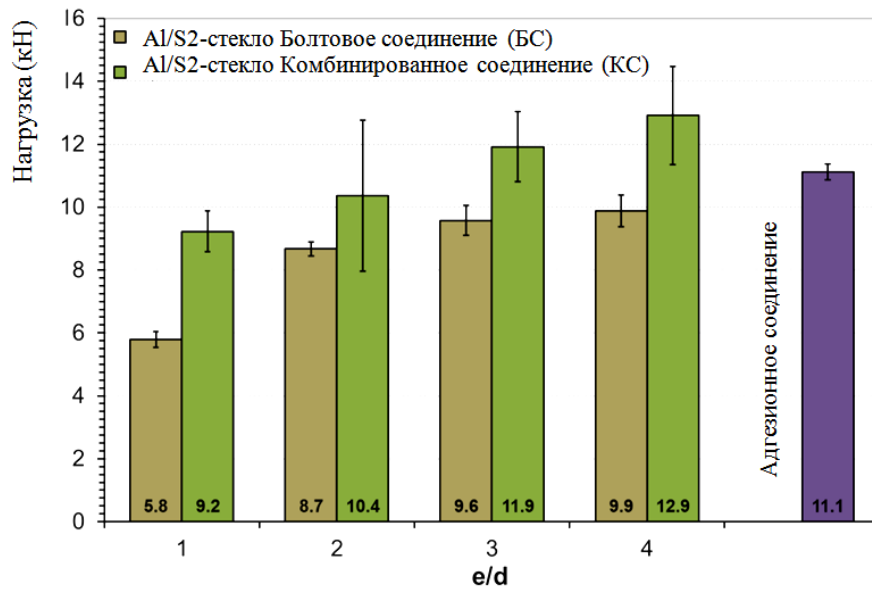
В первой части исследования проводились испытания соединения Al/S2-стекло, ориентация однонаправленных слоев в композите осуществлялась в четырех основных направлениях $0^\circ; 45^\circ; 90^\circ; -45^\circ$ (по 4 слоя), связующее смола SC-15, адгезив – клей FM94. Доказано, что такие соединения превосходят как болтовые, так и клеевые. С уменьшением расстояния от края детали до отверстия под болт ($e/d=4$) комбинированное соединение выдерживает ту же нагрузку, что и болтовое (рисунок 3), а это в свою очередь приводит к экономии материалов.

Вторая часть испытаний проводилась для сравнения соединений, описанных выше с альтернативными Al/E-стекло, где композитные пластины выполнялись из стеклоткани с ориентацией 16 слоев в двух направлениях $0^\circ; 90^\circ$, связующее – эпоксидная смола. Болтовое и гибридные соединения Al/E-стекло, проверенные при вибрационных нагрузках ($e/d=1$ и 4), сравнивали с соединением Al/S2-стекло (результаты представлены на рисунке 4).

¹¹ 1 дюйм (1 in) = 25,4 мм



а)



б)

Рисунок 3 – Максимальная нагрузка для болтовых, адгезионных, и комбинированных соединений, $e/d = 1 \dots 4$, Al/S2-стекло
 а) при статическом нагружении, б) при вибрационных нагрузках

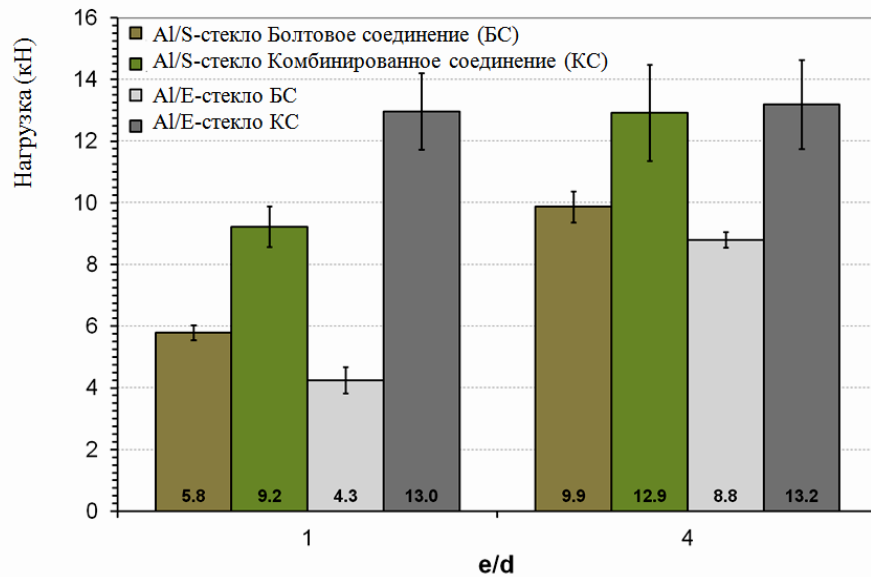


Рисунок 4 – Максимальная нагрузка для болтовых и комбинированных соединений Al/S2-стекло и Al/E-стекло, $e/d = 1$ и 4, при вибрационных нагрузках

Независимо от соотношения e/d болтовое соединение Al/E-стекло выдерживает меньшие нагрузки, а комбинированное соединение большие, чем их аналоги Al/S2-стекло, доказывая тем самым, что адгезионная составляющая силы для соединений на основе эпоксидной смолы выше. Адгезия вносит значительный вклад, учитывая, что волокна E-стекла выдерживают значительно меньшие усилия на разрыв, чем волокна S2-стекла. Кроме того, при увеличении e/d от 1 до 4 в комбинированном соединении Al/E-стекло происходит увеличение выдерживаемого усилия всего на 1,5%, из чего следует, что отказ соединения определяется адгезионной составляющей. Действительно средство связывания адгезива к пластине из E-стекла больше, чем к пластине из S2-стекла, поскольку в комбинированном соединении Al/E-стекло сложный или адгезивный характер разрушения (отказа) не зарегистрирован. Это также указывает на то, что необходимости в тщательной подготовке поверхности пластины из E-стекла нет, в то время как для пластины из S2-стекла, где сложный или адгезивный отказ наблюдался, такая подготовка будет оказывать значительное влияние на рабочие характеристики.

Далее проводились испытания на вибрационных нагрузках болтового соединения Al/S2-стекло и соединения пластины из высококачественной легированной стали (ВЛС)/ S2-стекло, результаты представлены на рисунке 5.

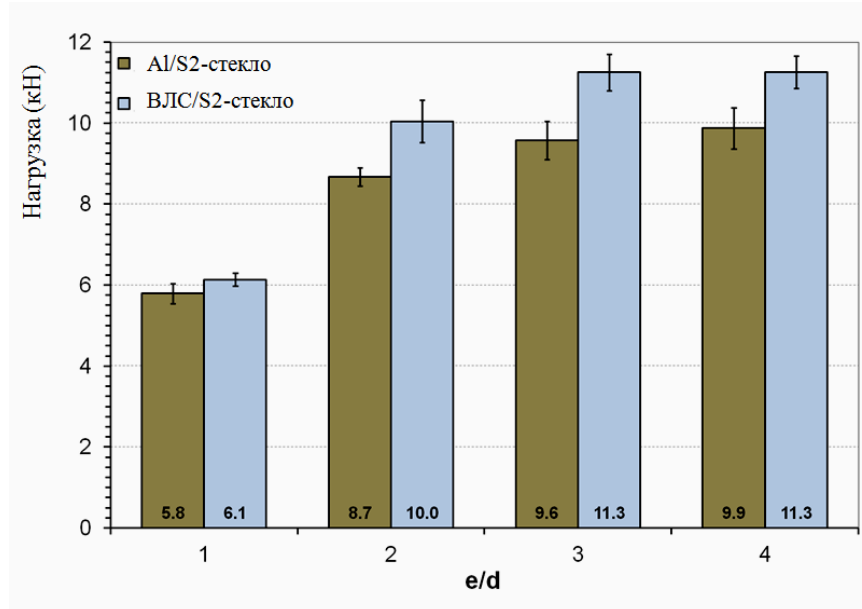


Рисунок 5 – Максимальная нагрузка для болтовых соединений Al/S2-стекло и ВЛС/S2-стекло, $e/d = 1 \dots 4$, при вибрационных нагрузках

Кроме того, были проведены сравнительные испытания комбинированного и болтового соединений стальной пластины ВЛС/S2-стекло, которые показали, что в отличие от соединений Al/S2-стекло (где происходит значительное увеличение разрушающей нагрузки при сравнении болтового и комбинированного соединений), в случае со сталью разрушающие нагрузки идентичны, что, по мнению автора, явилось следствием недостаточно тщательной подготовки (пескоструйная обработка) стальной поверхности перед склеиванием. Для проверки этой гипотезы была проведена серия дополнительных экспериментов, которая доказала ее справедливость (рисунок 6).

В результате было отмечено значительное увеличение разрушающей нагрузки в 43% и 41% ($e/d = 1$ и 2 соответственно), при этом отказ наблюдался в материале S2-стекла без сложных или адгезивных отказов. Коммерческая подготовка (травление, зачистка) поверхности для комбинированных соединений

AL/S2-стекло оказалась не целесообразной, что экономически более выгодно при их изготовлении.

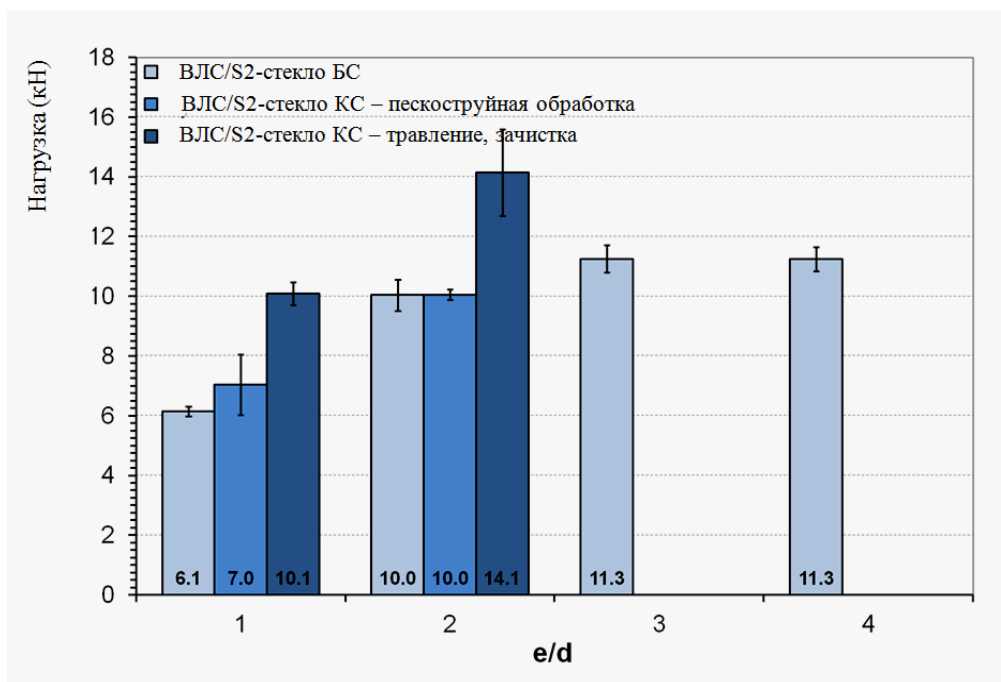


Рисунок 6 – Максимальная нагрузка для соединений ВЛС/S2-стекло, $e/d = 1$ и 2 , с различной подготовкой поверхности при вибрационных нагрузках

Последняя серия экспериментов была направлена на выявление влияния температуры при вибрационных нагрузках (повышение до 80°C). На рисунке 7 представлены разрушающие нагрузки комбинированных и болтовых соединений AL/S2-стекло при комнатной температуре и 80°C для $e/d = 1$ и 4 (за исключением КС при $e/d = 4$). Все виды образцов испытали значительное уменьшение разрушающей нагрузки при 80°C , порядка 20-30%. Так как температура стеклования для S2-стекловолокон 846°C , наиболее вероятно, что уменьшение значения силы произошло не из-за волокна. Учитывались и температура стеклования смолы SC-15 95°C , и прочность на сдвиг адгезива FM94 (по данным производителя) $46,6$ МПа при 24°C и $34,8$ МПа при 82°C (приблизительно 25%-е сокращение адгезионной составляющей силы, которая значительно влияет на полную силу, выдерживаемую соединением).

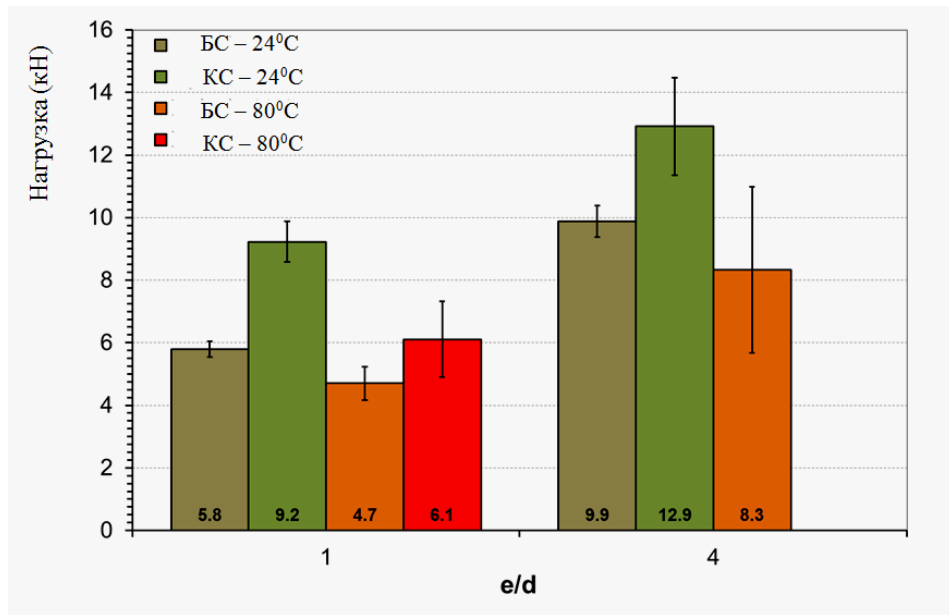


Рисунок 7 – Максимальная нагрузка для соединений Al/S2-стекло, $e/d = 1$ и 4 , $t = 24^{\circ}\text{C}$ и 80° , при вибрационных нагрузках

Так как повышенные температуры влияют на болтовое и комбинированное соединения одинаково, возможен вывод, что это влияние повышения температуры на конкретную смолу и/или адгезив.

Согласно результатам проведенных экспериментов, комбинированное соединение «металл-композит» выдерживает большие усилия, чем клеевое или болтовое. Конечно, чтобы оценить реальную выгоду от комбинированных соединений, необходимо рассмотреть стоимость подготовки поверхностей под склеивание, которая зависит от типа используемого металла (для стали дороже, чем для алюминия). Наконец, необходимо тщательно выбирать материалы соединения при работе с повышенными температурами, так как они могут существенно повлиять на композитные смолы и клеи.

Итак, рассмотренные комбинированные соединения требуют установки дополнительных соединительных элементов, которые увеличивают массу сборки. Кроме того, для них необходимо выполнить предварительные операции: сверление отверстий под крепеж или подготовку соединительной поверхности путем травления, шлифовки, и обезжиривание под склеивание. Вследствие перерезывания волокон в зонах отверстий происходит значительное снижение

прочности соединений, что ограничивает их применение в ответственных конструкциях [77].

В работе [78] (Holger Seidlitz, Lars Ulke-Winter, Lothar Kroll) предлагается выполнять отверстия в ПКМ по аналогии с природными явлениями, такими как перераспределения направления волокон древесины вокруг сучка. Локальным нагревом пластифицируется матрица, со стороны металлического листа при помощи специального заостренного инструмента внедряется (вворачивается) металлическая соединительная втулка, которая частично раздвигает волокна (полного отсутствия подреза волокон авторам избежать не удалось).

Такой способ соединения не требует никаких дополнительных соединительных элементов, что дает снижение массы и стоимости соединения. Кроме того, такая схема соединения характеризуется сокращением времени сборки и высокой степенью автоматизации процесса, а также, высокой прочностью (рисунок 8, 9).

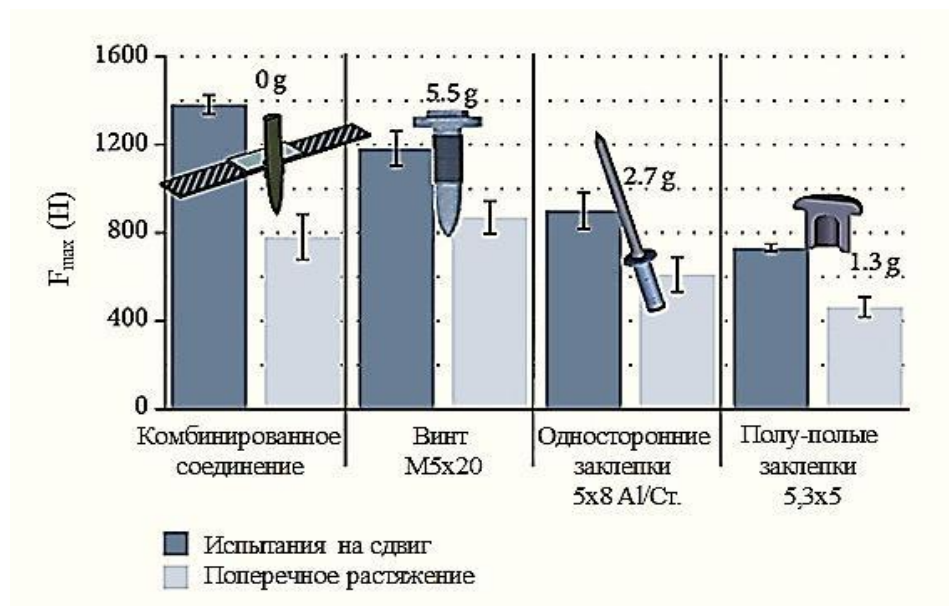


Рисунок 8 – Нагрузка отказа комбинированного соединения по сравнению с традиционными способами сборки

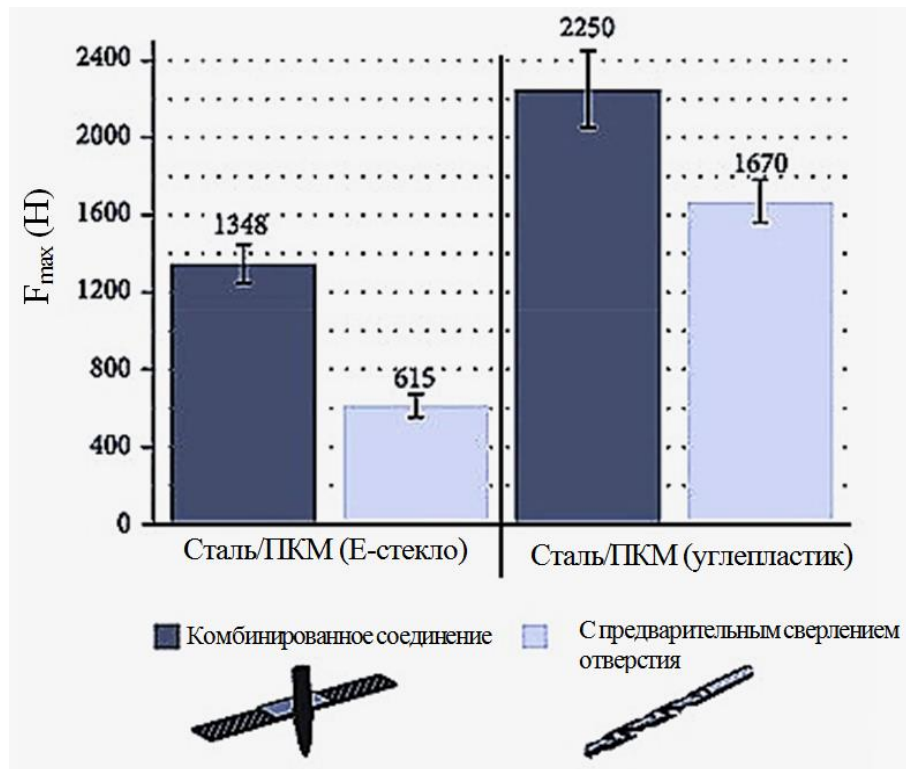


Рисунок 9 – Результаты испытаний на сдвиг соединений внахлестку «сталь-стеклопластик» и «сталь-углепластик» выполненных с заформованной втулкой и с предварительным сверлением отверстия под крепеж

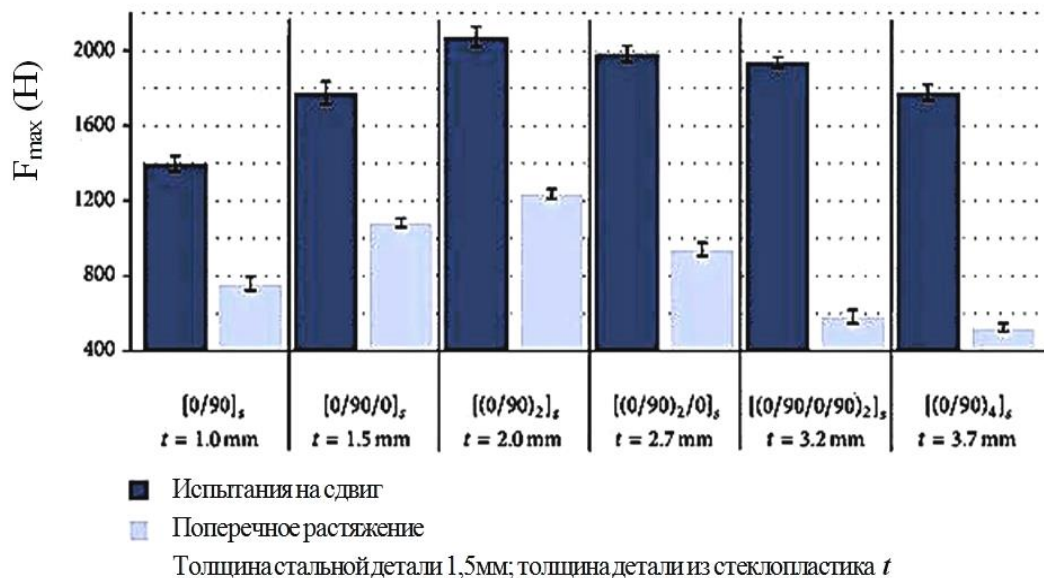


Рисунок 10 – Нагрузка отказа комбинированного соединения в зависимости от толщины стеклопластика

Очевидно, что несущая способность соединения в значительной степени определяется толщиной стеклопластиковой детали. Результаты эксперимента (рисунок 10) позволили сделать вывод, что оптимальное соотношение толщин соединяемых деталей 1,4 (несущая способность соединения стального листа толщиной 1,5 мм возрастает до толщины стеклопластиковой панели 2,0 мм, а затем падает)¹².

Рассмотренное комбинированное соединение требует для своей реализации специальное оборудование и оснастку, и может применяться для соединения тонкостенных элементов. Соединение таким способом композитных и металлических частей конструкции со значительной разницей толщины, по мнению авторов, не эффективно.

Для устранения недостатков комбинированных соединений, с 80-х годов XX века в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Э. Жуковского «ХАИ» разрабатывают клеештифтовые соединения, не требующие нарушения целостности волокон основы ПКМ, и, как следствие, не меняющие механические характеристики композита [65, 77]. В зоне соединения металлических частей конструкции с элементами из ПКМ устанавливаются крепежные элементы особой формы, которые внедряются в пакет препрега ПКМ и подвергаются совместной полимеризации. В результате волокна основы в зоне соединения сохраняют свою целостность, а крепежные элементы оказываются заформованными в тело КМ.

Преимуществами такого типа соединений является:

- сохранение целостности волокон ПКМ, что снижает концентрацию напряжений возле сформованного отверстия и обеспечивает минимальное ухудшение физико-механических свойств КМ;
- при надлежащей для конкретного соединения «сталь-композит» обработке соприкасающихся поверхностей обеспечивается надежное склеивание, без операций подгонки, что повышает несущую способность соединения и предотвращает отрыв (выдергивание крепежных элементов (КЭ));
- исключение операций механической обработки КМ;

¹² По данным Holger Seidlitz, Lars Ulke-Winter, Lothar Kroll [78].

- отсутствие жестких требований к состоянию поверхности металлической детали;
- возможность применения данного способа крепления при различных технологиях изготовления композита.

К недостаткам относятся:

- требование к остроте вершин КЭ, во избежание захватывания нитей КМ;
- тщательная обработка боковых поверхностей КЭ, во избежание перерезывания нитей КМ;
- неремонтопригодность;
- трудности неразрушающего контроля;
- образование «спутанной» зоны из чистого связующего вокруг КЭ, а также искривление волокон, приводящее к некоторому снижению прочности и жесткости КМ.

Аналогичные разработки ведутся и за рубежом. Например, в компании Боинг зарегистрировали ряд патентов по соединению композитных деталей при помощи вертикальных цилиндрических иголок (Z-pin) [79-81], в которых запатентованы: армированная Z-pin сэндвич-структура, для облегчения веса конструкции; соединение композитных деталей при помощи заформованных в тело композитов Z-pin и соединение «сталь-композит» аналогичными КЭ.

В виду развития программных систем конечно-элементного (МКЭ) анализа в сфере автоматизированных инженерных расчетов моделирование и анализ в некоторых областях промышленности позволяет избежать дорогостоящих и длительных циклов разработки типа «проектирование – изготовление – испытания». Однако, при компьютерном моделировании крупногабаритных деталей из КМ и их соединений для оценки напряженно-деформированного состояния МКЭ необходимо предварительно проанализировать возможность экстраполяции результатов лабораторных экспериментов с образцами незначительных размеров на конечный продукт, подробно этот аспект описан в работах [82-84] (Q. Yu, Z.P. Baz'ant, J.M. Bayldon, J.-L. Le, et al).

Вывод: несмотря на то, что исследованию методов крепления композитных деталей с металлическими частями конструкции в последнее время посвящено множество разнообразных работ, этот вопрос остается наименее проработанным при проектировании соединений «сталь-композит». Очевидно, что наиболее перспективным для ламинатных ПКМ является комбинированное клеештифтовое соединение «сталь-композит» (соединение с дискретными связями), не требующее нарушения целостности волокон основы ПКМ, и, как следствие, не меняющее его механические характеристики. Учитывая, что в основном соединения такого типа применяются в авиации и космической отрасли (хотя в последнее время наметилась тенденция к их применению и, например, в автомобилестроении), при определенных упрощениях в конструкции и технологии изготовления их можно применить и для восстановления деталей сельскохозяйственных машин. При этом на сегодняшний день отсутствует простой метод проектировочного расчета исследуемых соединений «сталь-композит», существующие методы не только громоздки и трудоемки, но и требуют высокой квалификации исполнителя.

1.3. Способы восстановления тонкостенных листовых корпусных деталей

В настоящее время для восстановления тонкостенных листовых корпусных деталей сельскохозяйственной техники наиболее распространен сварочно-наплавочный способ с применением газовой сварки. Основными достоинствами метода являются простота, доступность, относительно низкая себестоимость, возможность нанесения на изношенные поверхности детали металлических пластин практически любого размера и химического состава с заданной твердостью и износостойкостью.

Существенными недостатками метода является высокая энергоемкость, вредные условия труда, необходимость тщательной подготовки детали, высокая квалификация сварщика.

Для предотвращения образования дефектов в сварном соединении и получения качественного сварного шва детали должны быть тщательно очищены и вымыты (подготовка цилиндрических и плоских поверхностей сводится к зачистке их до металлического блеска). Обработка плохо подготовленной поверхности приводит к непроварам, образованию пор, раковин и загрязнению шва различными неметаллическими включениями. За счет неравномерности износа, который происходит по всей поверхности тонколистовой корпусной детали, после заварки дефектов возникает довольно значительное расхождение по толщине, так как зона рядом со сварным швом уже изношена в процессе эксплуатации «до ремонта». Кроме того, нагрев корпусной детали во время сварки приводит к изменению структуры кристаллической решетки металла в этой зоне, в результате, именно эта часть отремонтированной детали более подвержена деформации и возникновению дефектов при дальнейшей эксплуатации машины.

Как альтернатива сварочно-наплавочному способу широкое применение при ремонте крупногабаритных деталей в судопроизводстве и автомобилестроении, а именно: при заделке сварных швов, трещин механического (не усталостного) происхождения, пробоин и т.д., а также в изготовлении корпусов и палуб лодок и яхт получили эпоксидные клеевые композиции – ламинатные стеклопластики. В отличие от метода, рассмотренного выше, использование таких ПКМ позволяют не только выполнить «заплатку» в месте дефекта, но и, при необходимости, изготовить новую, ремонтную деталь. При этом многие производители на корпуса яхт, изготовленных из подобных стеклопластиков, дают гарантию от 10 лет и более¹³, что характеризует их как достаточно надежные.

В ремонтном (единичном) производстве наиболее широко применяется метод ручного (контактного) формования (рисунок 11). Применяемые материалы: смолы (любые, например, эпоксидные, полиэфирные, винилэфирные), волокна

¹³ Евченко, К. CAD/CAM-решения компании Delcam для производства изделий из перспективных композитных материалов [Электронный ресурс] / К. Евченко // САПР и графика. – 2008. – №8. – С. 113-120. – Режим доступа: <http://www.sapr.ru/Article.aspx?id=19459> свободный (дата обращения 30.09.2009).

(любые, например, стекловолокна, стеклоткани и маты), наполнители (любые, стойкие к используемым смолам).

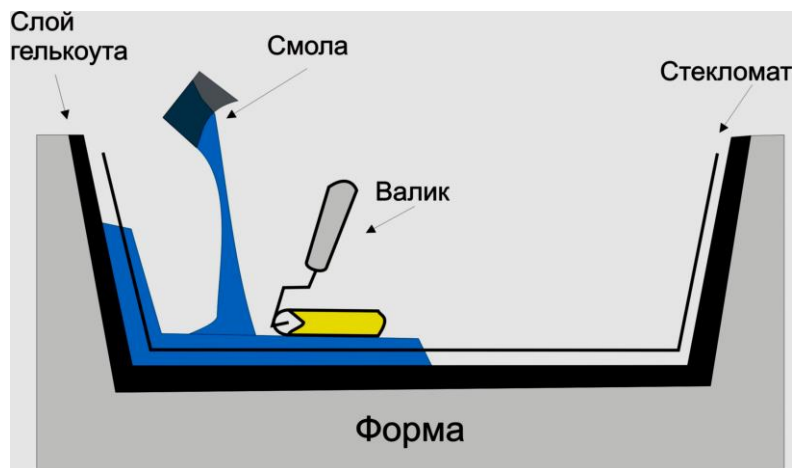


Рисунок 11 – Схема метода ручного (контактного) формования

Основными достоинствами метода являются: универсальность; доступность (широко используется в течение многих лет); простота процесса; недорогие используемые инструменты (при использовании смол, отверждаемых при комнатной температуре); широкий выбор поставщиков и материалов; более высокое содержание стеклянного наполнителя и более длинные волокна по сравнению с методом напыления рубленного роввинга; возможность получения изделий сложной формы и большого размера; низкая стоимость оснастки; возможность создавать слоистые конструкции, в том числе с закладными деталями; пригодность для опытного (единичного) производства.

К недостаткам можно отнести: затраты ручного труда, высокую квалификацию рабочего (от которого зависят: качество смеси смолы и катализатора, содержание стекловолокна в ламинате, качество ПКМ), вероятность воздушных включений в ПКМ, низкую производительность и вредные условия труда.

Учитывая, что состав композита и его толщина зависят от соотношения количества стекловолокна и смолы, надлежащий контроль поступающего сырья

является одновременно и способом контроля получаемой продукции. Эпоксидные композиции представляют собой многокомпонентные составы. Очевидно, что ряд технологических трудностей при их применении, связан, прежде всего, с недостаточной жизнеспособностью композиции. Кроме того, требуются определенные навыки при дозировке компонентов, так как от этого в значительной степени зависят физико-механические свойства. Процесс трудоемкий и автоматизации до недавнего времени не поддавался.

На сегодняшний день существует ряд распылителей с внешним смешиванием материала, которые решают эту проблему. Например, двухкомпонентная распылительная система G-200 (Россия, стоимость около 22000 руб.)¹⁴ или двухфазный пистолет-распылитель Graco Hopper Gun (США, стоимость около 200-250\$, поставляется в Россию группой компаний «Композит»)¹⁵, с автоматическим дозированием и внешним смешиванием компонентов, что устраняет вышеперечисленные недостатки эпоксидных композиций.

Технология воздушного обволакивания факела (AAC), рисунок 12, применяемая в современных распылителях, позволяет предотвратить попадание материала за пределы факела (на пол, стены и одежду оператора), что в свою очередь ведет к экономии средств и улучшению условий труда. Кроме того, такая технология позволяет формировать факел, в котором капли материала поступают к обрабатываемой поверхности под очень низким давлением. Малая скорость движения частиц способствует формированию малой турбулентности в материале в момент его соприкосновения с поверхностью, что позволяет значительно снизить вероятность формирования пузырьков воздуха и образования пор.

Для более крупных ремонтных предприятий в настоящее время доступны дозаторы ProMix (Graco, США стоимость 10000-25000 \$ в зависимости от комплектации и модели, поставляется в Россию группой компаний «Композит»),

¹⁴ Источник: [Электронный ресурс]. – Режим доступа [http://www.igc-siberia.ru/doc/G200_p01\(1\).pdf](http://www.igc-siberia.ru/doc/G200_p01(1).pdf) (10.10.2015), свободный.

¹⁵ Источник: [Электронный ресурс]. – Режим доступа http://anticorcomposite.ru/catalog/graco/index.php?act=9&mode=1&SECTION_ID=217 (10.10.2015), свободный.

которые позволяют использовать в производстве преимущества многокомпонентных материалов на основе эпоксидных смол.

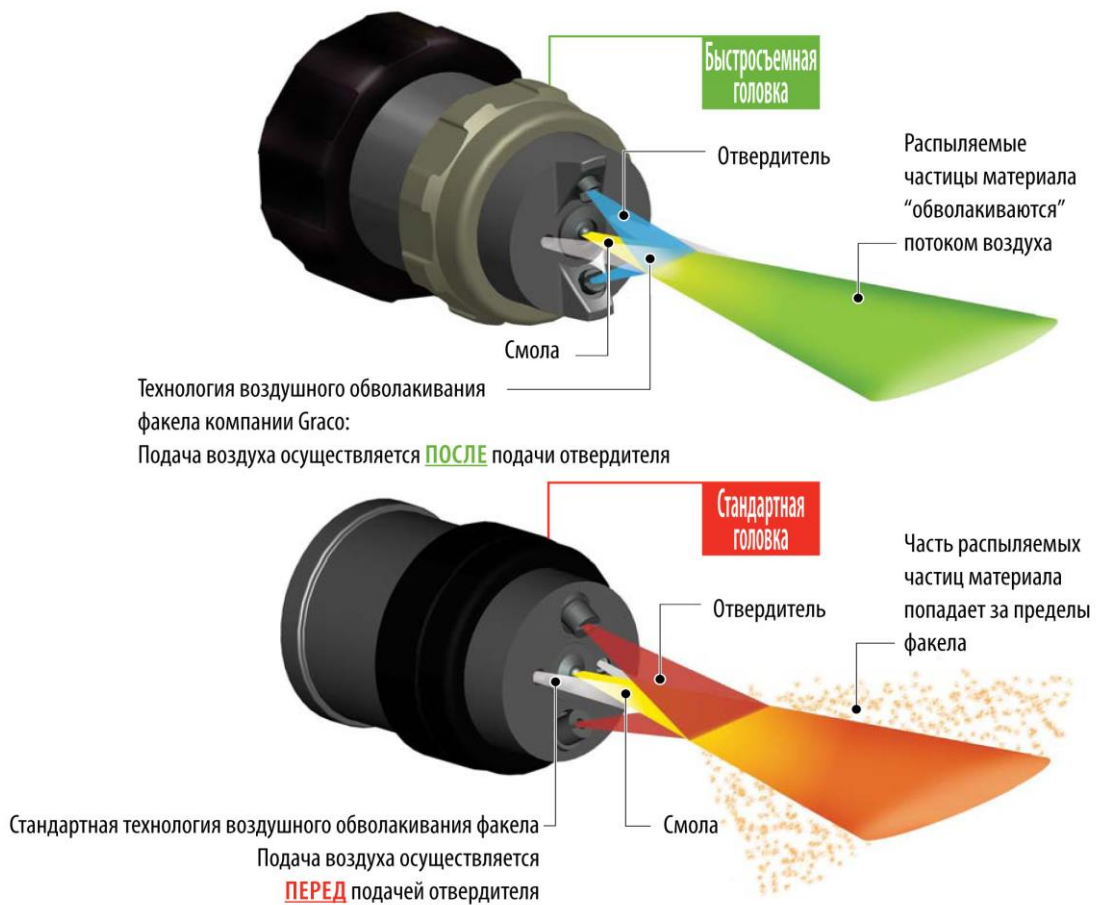


Рисунок 12 - Технология воздушного обволакивания факела (ААС)¹⁶

Для получения более плотной и однородной структуры композита, возможно применение вакуумного формования. После укладки всех армирующих слоев, пока смола еще не полимеризовалась, на матрицу с формой накидывается вакуумный мешок (диафрагма) и герметизируется лентой. Из герметичной полости, образующейся между формируемой композицией и диафрагмой, откачивают воздух, чтобы давление там было ниже, чем приложенное к внешней стороне диафрагмы. Благодаря образующемуся перепаду давлений с разных сторон диафрагмы происходит прижим ПКМ к форме, что обеспечивает

¹⁶Источник: [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.legion-techno.ru/graco-raspyliteli-serii-RS/> (10.10.2015), свободный.

конструктивное оформление детали. При таком формовании получают изделия, наружная и внутренняя поверхности которых повторяют морфологию поверхностей формующих элементов (самой формы и диафрагмы). Кроме того, в процессе прижима формуемая композиция уплотняется в результате устранения пустот и удаления избытка смолы. Вакуум может создаваться как подручными средствами – обычный автомобильный насос, так и специальными вакуумными насосами¹⁷. В вакуумный мешок поочередно укладывается: специальная полиамидная «жертвенная» ткань, которая не имеет адгезии к смоле (поверхность будет чистой и матовой); второй слой – перфорированный полиэтилен; третий – дренажная ткань, которая является также распределителем давления по всей площади мешка.

Вывод: применение ПКМ на основе эпоксидных композиций и стекловолокна в качестве заменяющих сталь материалов для восстановления крупногабаритных тонколистовых корпусных деталей сельскохозяйственной техники, при наличии подходящего оборудования, может стать альтернативой сварочно-наплавочному способу с применением газовой сварки, особенно в условиях отсутствия на рынке запасных частей.

1.4. Выводы и задачи исследования

Накопленный в настоящее время опыт создания и эксплуатации средне- и слабонагруженных агрегатов из КМ обеспечивает разработку рациональных по массе элементов машин, однако, анализ доступной информации показывает, что ПКМ крайне мало применяются для восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники, бункеров и пр. деталей, работающих в условиях коррозии или повышенного износа, несмотря на то, что именно в этом направлении применение модифицированных ПКМ технологически обосновано. Кроме того, при восстановлении в условиях ремонтных мастерских сельхозмашин, снятых с производства по разнообразным причинам, но

¹⁷ Например, НВР – производства РФ http://promtechnik.ru/vakuumnye_nasosy_nvr_rossiya

эксплуатируемых в настоящее время, применение ПКМ в качестве заменяющих сталь материалов может стать рациональным решением в условиях ремонтных мастерских (при наличии подходящего оборудования) с учетом отсутствия запасных частей.

Такое состояние дел обусловлено недостаточным количеством инженерных методик проектирования, учитывающих специфические особенности КМ: анизотропию физико-химических характеристик, низкую прочность на смятие и межслойный сдвиг, разномодульность, слоистость структуры и др., а также трудоемкостью проектирования и изготовления узлов крепления композитных и металлических частей конструкции.

К недостаточно изученным аспектам темы относятся: подбор ПКМ (ввиду отсутствия баз данных) и модификация его в зависимости от нужд потребителя; соединение «сталь-композит», а также простой, но эффективный метод расчета на прочность указанного соединения.

На основании обзора литературы и изучения состояния проблемы можно определить следующие задачи исследования:

- выявить возможность увеличения износостойкости поверхности ламинатных полимерных композитов к истиранию под действием подвижных абразивных сред для повышения эффективности восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники;
- разработать соединение композитных и металлических частей конструкций сельскохозяйственной техники;
- разработать методику расчета на прочность соединения «сталь-композит» для использования при ремонте сельскохозяйственной техники;
- экспериментально обосновать рациональные параметры указанного соединения для восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники.

2. Теоретические предпосылки повышения эффективности эксплуатации и ремонта тонкостенных корпусных узлов сельскохозяйственной техники

2.1. Подбор компонентов ПКМ для восстановления тонколистовых корпусных деталей сельскохозяйственной техники

Использование ПКМ в изготовлении и модернизации тонкостенных узлов и деталей сельскохозяйственной техники приводит к значительному снижению массы последних с одновременным увеличением коррозионной стойкости и долговечности, а ремонт с применением этих материалов может производиться без дорогой оснастки и оборудования в условиях ремонтных мастерских, что снижает производственные затраты. В случае внедрения ПКМ для изготовления тонкостенных деталей, испытывающих не только воздействие внешних нагрузок, но и абразивных материалов (элементы желобов, самотечных устройств, силосопроводы, конфузоры, бункеры и пр.), а также работающих в условиях агрессивных сред необходимо вводить в матрицу ПКМ составы, повышающие поверхностную твердость и износостойкость. Преимущества ПКМ заключаются в возможности широкого варьирования свойств не только путем выбора компонентов, но и их соотношения, а также рациональной схемы армирования.

Наиболее подходящими для ремонта машин и оборудования являются, по мнению экспертов, эпоксидные смолы, комплекс свойств которых отвечает всем необходимым требованиям. Эпоксидные смолы доступны, имеют хорошую адгезию к большому числу наполнителей, армирующих компонентов и подложки. Большой выбор отвердителей позволяет получить после полимеризации материалы с разнообразным сочетанием свойств, в зависимости от области применения и нужд потребителя. В ходе химической реакции между смолой и отвердителем не выделяются никакие летучие вещества или вода, при этом усадочные явления ниже, чем у фенольных или полиэфирных смол, которые также подходят по экономическим соображениям. Отвержденные

эпоксидные смолы обладают химической стойкостью к бензину, тосолу и маслам. При ремонте удобнее использовать отвердители, работающие при комнатной и отрицательной температурах, что соответствует подгруппе аминных. Наибольшее распространение получили полиэтиленполиамины (ПЭПА). Отвержденные эпоксидные смолы в чистом виде хрупки и плохо выдерживают вибрацию и удары, в связи с чем, для эластичности состава на их основе, вводят пластификаторы. Задача последних не только уменьшить хрупкость, но и повысить устойчивость к резкой смене температур (например, устойчивость к морозу), для ремонтных производств рекомендуется выбирать дибутилфталат (ДБФ) [23-24, 28, 30, 43].

Композиционные материалы, основанные на эпоксидных смолах, начали применять еще в пятидесятых годах. В конце шестидесятых Россия лидировала в этом направлении наравне с США и Германией. Следует отметить, что композиционные материалы с высокими прочностными характеристиками, выпускаемые за рубежом сегодня, являются в основном аналогами тех, которые в свое время разрабатывали отечественные ученые. Но недостаточное финансирование науки РФ в конце восьмидесятых и девяностых годах привело к тому, что это направление развивалось не эффективно [14-15, 85].

Из различного вида армирующих волокон для сельхозмашиностроения наиболее приемлемы стеклянные, имеющие высокие механические характеристики, стойкость к атмосферным воздействиям и минимальную стоимость [23, 43, 86]. Механические свойства стеклопластиков определяются преимущественно характеристиками наполнителя и прочностью взаимодействия его со связующим. Наибольшей прочностью и жесткостью обладают стеклопластики, содержащие ориентированно расположенные непрерывные волокна. Каждый индивидуальный слой состоит из однонаправленных волокон, определяющих направление слоя, и матрицы, обеспечивающей нормальную и трансверсальную жесткость слоя.

Большинство типов слоистых структур подвергаются сложному нагружению, меняющемуся от точки к точке. Так как ориентация волокон

внутри слоя не может быть изменена без разрушения волокна, желательно, чтобы ориентация однонаправленных слоев в композите осуществлялась в четырех основных направлениях $0^\circ; 45^\circ; 90^\circ; -45^\circ$, составляющих четыре основных группы. В зависимости от требований число слоев каждого вида может варьироваться. Относительно биссектрисы угла между осями ориентации слоев $+45^\circ$ и -45° существует ось симметрии. Это уменьшает возможность коробления композита. Для уменьшения напряжений в матрице и обеспечении максимальной реализации свойств волокон слои должны быть ориентированы минимум в трех направлениях $0^\circ; 45^\circ; -45^\circ$. В большинстве конструкций используются слоистые композиты с ориентацией слоев во всех четырех направлениях. Это позволяет минимизировать напряжения в матрице и создавать наиболее благоприятные условия поведения композита [23, 54]. Изменяя ориентацию волокон, можно в широких пределах регулировать механические свойства стеклопластиков. Кроме того, стеклопластики относятся к материалам, уровень прочностных показателей которых за время эксплуатации снижается не более чем на 10-20%¹⁸.

Изменить физико-механические свойства эпоксидных композиций способны так же и модификаторы, комбинируя объемное содержание компонентов, можно, в зависимости от назначения, получать композитные материалы с требуемыми значениями прочности, жаропрочности, модуля упругости, абразивной стойкости, а также создавать композитные материалы с необходимыми магнитными, диэлектрическими, радиопоглощающими и другими специальными свойствами [23-28, 85].

Кроме того, для специализированных ремонтных предприятий и участков с небольшими объемами и широкой номенклатурой для получения износостойких покрытий при создании КМ целесообразно применять металлизированные порошки [87].

В условиях агрессивных сред и повышенного износа необходимо рассмотреть возможность упрочнения поверхности композита с одновременным

¹⁸ По данным ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ

увеличением износостойкости к действию подвижных абразивных сред введением в матрицу ультрадисперсных порошков бемита $Al(OOH)$ и корунда Al_2O_3 – продуктов окисления алюминия, полученных в алюмоэнергетическом реакторе¹⁹. Технические характеристики порошков наполнителей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики порошков наполнителей

Наименование показателей	Нанокристаллический порошок	
	оксигидроокиси алюминия (БЕМИТ) $Al(OOH)$, ТУ 2133-001-58849237-2003 «Алюминия оксигидроокись (БЕМИТ)»	оксида алюминия (корунд) Al_2O_3
	Норма	Норма
Массовая доля основного вещества, %, не менее	99,9	99,8
Размер кристаллов, нм, не более	50	50
Средний медианный размер частиц, мкм, не более	6	10
Удельная специфическая поверхность, m^2/g	10...400	100...600
Истинная плотность, g/cm^3 , не более	3,06	4,0
Цена ²⁰ , руб. за кг от	600	700

Выбор добавок основан на результатах экспериментальной оценки применения нанокристаллических оксидов и гидроксидов алюминия [89-90], а также на анализе изготовления высококачественного ламината. В последнем, для

¹⁹ По данным Лаборатории разработки технологий безразборного сервиса узлов и агрегатов машин с применением наноматериалов (№ 5) ФГБНУ ГОСНИТИ эффективность применения указанных материалов в антикоррозионных покрытиях снижает коррозионные потери металла в 2-8 раз, уменьшает износ втулочно-роликовых цепей в 2 раза. Введение нанокристаллических гидроксида и оксида алюминия в смазочные масла уменьшает изнашивание поверхности трения на 35%. Источник: [Электронный ресурс]. – Режим доступа http://www.portalnano.ru/read/iInfrastructure/russia/mns/gosniti/02_21_05 (10.10.2015), свободный.

²⁰ Информация по состоянию на 2009г.

защиты, декоративный слой покрывается прозрачными меламиновыми или акрилатными смолами. В самых качественных марках ламината для повышения износостойкости в смолу добавляют частицы корунда. Таким образом, данные добавки должны менять механические характеристики КМ, в частности пределы прочности, износостойкость, микротвердость и т.д.

Кроме всего перечисленного известно, что оксидные покрытия являются коррозионностойкими, износостойкими, обладают электроизоляционными свойствами и поглощают красители. Последнее позволяет получать поверхности разнообразной цветовой гаммы [91].

Вопрос повышения износостойкости поверхности введением указанных порошков рассматривался в Лаборатории новых видов энергетики ФГБНУ ГОСНИТИ, г. Москва, а также при изучении ПКМ на базе Государственного Научного центра РФ ОАО «ОНПП» Технология²¹, г. Обнинск. Для определения износостойкости на специальном стенде было проведено сравнительное тестирование дисков (рисунок 13), выполненных из одного листа стеклоткани, пропитанного эпоксидной смолой с отвердителем ПЭПА и пластификатором ДБФ в двух вариантах: а) без покрытия и б) с односторонним покрытием гелькоутом с включением ультрадисперсного порошка корунда [86].

Диски поочередно устанавливались в металлический стакан на специальные штыри, вставляемые в отверстия, и подвергались воздействию металлического шарика, который, вращаясь в специальной оправке, перемещался по поверхности диска с усилием F .

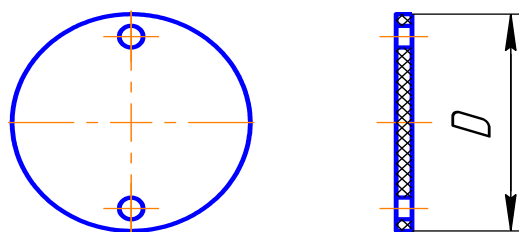


Рисунок 13 – Образец для тестирования на износостойкость

²¹ Работа выполнена при поддержке Министерства образования Российской Федерации (грант 01.2003.313430).

При механическом воздействии шарика гелькоут деформировался, и частицы корунда выдавливались из матрицы. В случае удаления корунда воздушной струей или потоком жидкости износостойкость образца, покрытого гелькоутом с корундом, была в 2 раза выше, чем у образцов без покрытия. В противном случае износостойкость покрытого образца резко уменьшалась по сравнению с износостойкостью образца без покрытия, что объяснялось абразивным воздействием выдавленных частиц Al_2O_3 .

Учитывая, что удаление частиц, выдавленных из матрицы воздушной струей (или струей жидкости), для исключения дополнительного абразивного износа, имитирует натуральный режим взаимодействия поверхности ПКМ при транспортировке движущихся абразивных сред, в условиях проводимого исследования сделан вывод о положительном влиянии введения ультрадисперсного порошка на износостойкость поверхности трения [92].

Кроме того, в ФГБНУ ГОСНИТИ было опробовано применение нанокристаллических порошков алюминия в составе ПКМ, с целью улучшения его характеристик. Испытания проводили при покрытии образца на основе стеклоткани и смолы ЭД-6 тонким слоем смолы и корунда. Твердость поверхности увеличилась в 2 раза [93]. Наноструктурный бемит использовали для создания покрытий, полученных методами вакуумного, динамического и газотермического напыления. В результате проведенных исследований установлено, что применение бемита повышает твердость, вязкость разрушения и коррозионную стойкость покрытия [94].

Достаточно часто при оценке возможности применения ПКМ, как и любого другого полимерного материала, возникает вопрос о климатическом старении под действием солнечной радиации и температурных перепадов.

Климатическое старение материалов, в том числе и ПКМ на основе эпоксидных соединений подробно рассмотрено в работах [95-97] ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ (Е.Н. Коблов, О.В. Старцев, А.С. Кротов, В.Н. Кириллов). Авторами убедительно доказывается, что при изучении ПКМ на основе эпоксидных композиций УФ-компонентой солнечной радиации можно

пренебречь из-за деструкции, вызванной ею, только в тонком поверхностном слое (не более 50-100 мкм), а главными факторами, вызывающими старение, являются температура и влажность.

Необходимо отметить при этом, что температура, как отдельно действующий фактор не приводит к ухудшению свойств ПКМ, если связующее находится в стеклообразном состоянии. При длительном воздействии температуры, соответствующей области перехода связующего из стеклообразного в высокопластичное состояние, наблюдаются процессы физического старения ПКМ: доотверждение, структурная релаксация, усадка, снятие остаточных напряжений, что способствуют улучшения свойств ПКМ.

На начальной стадии климатического старения ряд свойств ПКМ меняется не из-за физико-химических превращений, а вследствие релаксации исходной структурной неравновесности композита. При этом стеклопластик на основе эпоксидного связующего был охарактеризован как материал устойчивый к длительному воздействию агрессивной внешней среды (испытания при температуре $60\pm 1^\circ\text{C}$ и относительной влажности $98\pm 2\%$, условия жаркого влажного тропического климата, в течении 2000 часов – 5 непрерывных циклов увлажнение-сушка), уменьшение модуля сдвига составило в среднем около 14%, по сравнению с первым циклом во время которого композит пришел в равновесное состояние.

Однако, авторы доказывают, что долговечность деталей из ПКМ при совместном воздействии климата и механических нагрузок в основном зависит от уровня нагружения. Согласно рекомендациям [97], если последний ниже 60% от предельного, то влияние климатического старения незначительно.

Вывод: для повышения эффективности восстановления корпусных деталей в условиях ремонтной мастерской оптимальным является применение ПКМ на основе стекловолокна и связующего (С) – эпоксидной смолы с отвердителем ПЭПА и пластификатором ДБФ. Указанные компоненты наиболее рациональны по себестоимости, а изготовленный на их основе КМ, обладает высокими прочностными, диэлектрическими свойствами, достаточно низкой

плотностью и высокой атмосферо-, водо- и химстойкостью. В качестве модификаторов выбраны ультрадисперсные порошки бемита $Al(OOH)$ и корунда Al_2O_3 , которые, увеличивают износостойкость поверхности к действию подвижных абразивных сред и, предположительно, помогут добиться упрочнения поверхности композита. При этом не изученным остается вопрос влияния указанных порошков (их наличие и степень присутствия) на прочностные свойства выбранных ПКМ.

2.2. Теоретические аспекты проектирования и расчета соединения «сталь-композит»

Опираясь на проведенный обзор литературы, можно сделать вывод, что замена стальных узлов и деталей композитными технологически возможна не только при изготовлении машины в серийном производстве, но и при восстановлении ее в условиях ремонтной мастерской. Наиболее сложным в этом случае является решение задачи по проектированию и расчету соединяющих агрегаты металло-композитных узлов. Анализ разрушения конструкций подтверждает, что в подавляющем большинстве случаев разрушение начинается с узлов и стыков элементов, так как именно там напряжения распределены наиболее неравномерно.

2.2.1. Проектирование соединения «сталь-композит»

Волокнистые и слоистые КМ позволяют повысить эффективность конструкции и оптимизировать ее по массе. Однако, существует ряд проблем, связанных с трудностями соединения деталей из КМ между собой и металлическими элементами конструкции [65-66, 77].

Целью данного раздела диссертационного исследования являлась разработка указанных соединений, не требующих нарушения целостности

волокон основы ПКМ, и, как следствие, не меняющих механические характеристики композита.

Одним из возможных вариантов решения поставленной задачи является применение комбинированного соединения: в зоне монтажа металлических частей конструкции с элементами из ПКМ устанавливаются крепежные элементы (КЭ) особой формы, которые внедряются в пакет препрега ПКМ и подвергаются совместной полимеризации. В результате волокна основы в зоне соединения сохраняют свою целостность, а КЭ оказываются заформованными в тело ПКМ.

Реализация такого соединения на практике довольно проста. Металлическая часть конструкции, предварительно очищенная и обезжиренная, посредством закрепленных КЭ, внедряется в пакет препрега, образованный последовательно выложенными слоями стеклоткани, пропитанными связующим. Для обеспечения надежного склеивания, в слой препрега непосредственно контактирующий с металлом дополнительно вводится эпоксидный клей (адгезив) во избежание возникновения «голодного» соединения и как следствие, низкой адгезионной прочности. В таком положении осуществляется совместная полимеризация композита с внедренными КЭ.

Учитывая, что при контакте с аппретированным пакетом препрега происходит внедрение КЭ между волокнами стеклоткани, для исключения подреза последних рекомендуется выполнять КЭ с наконечником переменной толщины, что обусловлено также и технологическими соображениями.

Вывод: для дальнейшего изучения в качестве перспективных выбраны: широко применяемый в авиации игольчатый КЭ, треугольная пластина, а также предлагается новый КЭ – цилиндрический штифт с копьеобразной (лопатообразной) законцовкой. Последний, учитывая специфику ламинатных композитов, должен обеспечить более прочное соединение, особенно при нагружении нормальной, выдерживающей силой. Предположительно на усилие, выдерживаемое предлагаемым соединением, будет влиять не только форма КЭ заформованных в композит, но и расположение этих КЭ, особенно пластин, по отношению к нагрузке; глубина внедрения; геометрия самого КЭ.

2.2.2. Методика расчета соединения «сталь-композит»

Существующие методы расчета соединений «сталь-композит» не только громоздки и трудоемки, но и требуют высокой квалификации исполнителя. В связи с чем, для применения на практике необходим простой, но достаточно эффективный метод расчета предлагаемого соединения «сталь-композит» на прочность. Так как изучаемое соединение в большинстве эксплуатационных случаев находится в сложном напряженном состоянии, рассмотрим на основе принципа независимости действия сил несколько простых состояний данного соединения. Нагрузку, действующую в предлагаемом соединении можно в первом приближении разделить на осевую – срезающую КЭ, и нормальную – выдергивающую КЭ. Определить последнюю является довольно сложной задачей, так как в настоящее время не существует экспериментально подтвержденных методик ее нахождения. В рамках данного исследования необходимо спланировать и провести серию экспериментов с целью получения расчетной модели.

В связи с тем, что ряд рассматриваемых КЭ – пластины, введем безразмерный коэффициент K_p , отражающий влияние расположения плоскостей КЭ по отношению к срезающей нагрузке на прочность рассматриваемого соединения, величину и правомерность введения которого уточним после проведения и обработки соответствующих экспериментов. Учитывая, что во время проведения пробного (установочного) эксперимента наблюдался срез первого КЭ у свободного конца стального листа в начале разрушения, то предлагается выполнять стандартный инженерный расчет на срез, вводя коэффициент K_p , а также учитывать возможное разрушение соединения по площадке, перпендикулярной силе.

Теоретические расчеты [98] и экспериментальные исследования показывают, что КЭ расположенные вдоль действия срезающей силы нагружены неодинаково. Поэтому, в дальнейшем, для уточнения теоретических расчетов и

построения более корректной математической модели, предлагается учитывать действие внутренних сил в КЭ путем решения статически неопределимой задачи методом сил с введением в коэффициенты системы канонических уравнений коэффициента податливости.

Согласно [68] проектировочный расчет подобного соединения «сталь-композит» состоит в выборе параметров, удовлетворяющих следующим условиям прочности: на срез КЭ; на смятие КЭ и соединяемых им деталей; на срез детали до ее края или до следующего ряда КЭ; на разрушение деталей по ослабленному сечению от ее растяжения или сжатия. Кроме перечисленного необходимо также учесть разрушение адгезионного соединения листов ПКМ со стальным листом.

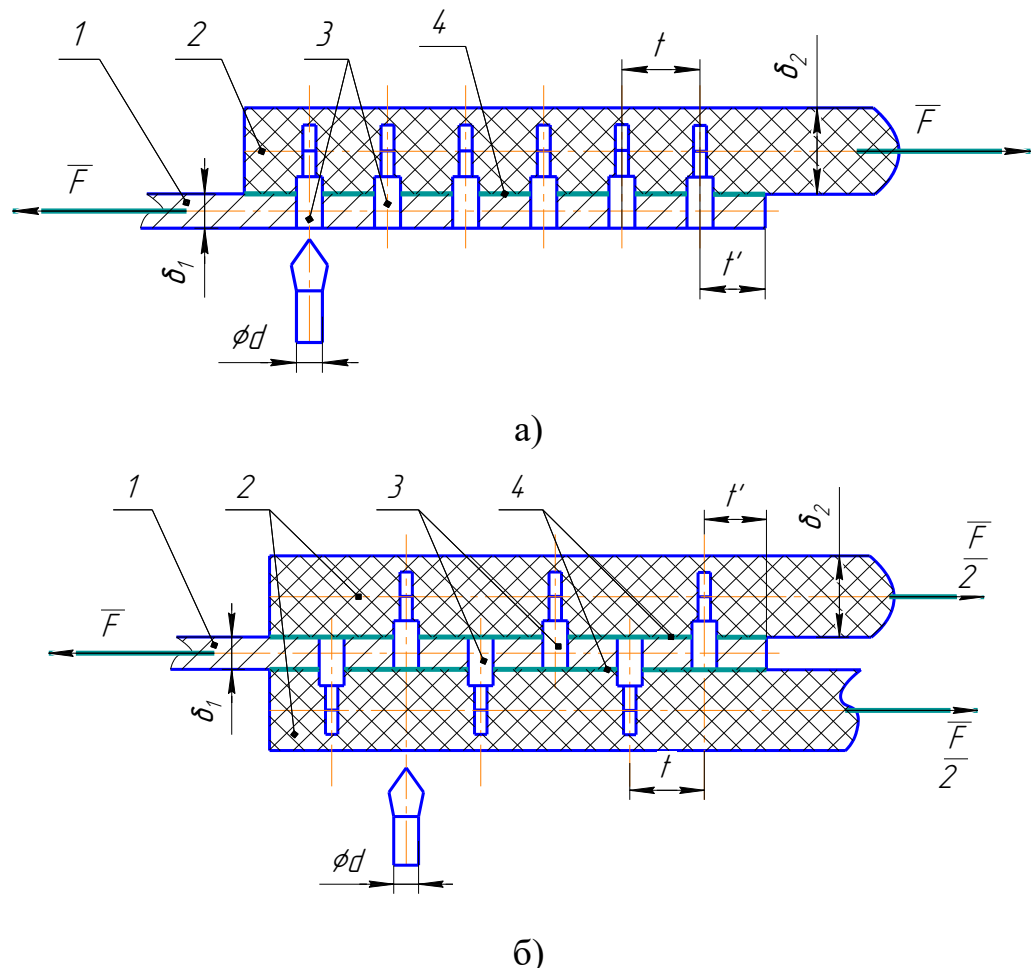


Рисунок 14 – Схемы исследования металло-композитного соединения, где 1 – стальная пластина, 2 – деталь(и) из ПКМ, 3 – КЭ, 4 – эпоксидный клей:
 а) «нахлестка», б) «пакет»

Рассмотрим расчет при проектировании соединений с шестью крепежными элементами (КЭ)²² типа:

- «нахлестка», рисунок 14а (в связи с возможностью его использования при креплении листа или профиля из композита не только к стальному листу, но и к любому стальному профилю (уголку, швеллеру, тавру, двутавру и пр.);
- «пакет» рисунок 14б (для выполнения двухстороннего крепления, с симметричным съемом нагрузки).

Условие прочности на срез КЭ

Наиболее вероятное разрушение изучаемого соединения – это срез КЭ:

$$\tau_{cp} = \frac{Q_{cp}}{A} \leq [\tau_{adm}]_{cp}, \quad (2.1)$$

где Q_{cp} – средняя перерезывающая сила, действующая на КЭ, которую в дальнейшем будем учитывать с поправочными коэффициентами K_p и K – коэффициентом перенапряжения КЭ в рассматриваемом ряду (чаще всего в первом от конца стального листа КЭ);

$A = n \cdot \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь поверхности среза КЭ;

n – число КЭ;

d – диаметр срезаемой части КЭ;

$(\tau_{adm})_{cp}$ – допускаемое напряжение материала КЭ на срез.

Условие прочности на смятие материала стального листа

$$\sigma_{1cm} = \frac{N_1}{\delta_1 \cdot d} \leq (\sigma_{adm})_{1cm}, \quad (2.2)$$

где N_1 – продольная сила в листе стали;

²² Количество КЭ в соединении выбрано в предположении его дальнейших экспериментальных исследований на прочность

δ_1 – толщина стальной детали;

$(\sigma_{adm})_{1cm}$ – допускаемое напряжение смятия стальной детали.

Условие прочности на смятие ПКМ

Смятие ПКМ является довольно сложной характеристикой. В настоящее время не существует единого мнения даже о способе ее экспериментального определения. Для проектировочного расчета в первом приближении можно воспользоваться эмпирической зависимостью, полученной в [65] для квазиизотропного стеклопластика (при расположении слоев ПКМ в нескольких направлениях значения механических характеристик будут находиться между значениями для продольной и поперечной деформаций, а ориентация слоев ПКМ в четырех направлениях $0/90^\circ/\pm 45^\circ$ позволяет считать полученный материал изотропным):

$$\sigma_{2cm} = 325 - 25 \cdot \frac{d}{\delta_2} \leq (\sigma_{adm})_{2cm}, \quad (2.3)$$

где σ_{2cm} , [МПа] – напряжение смятия детали из ПКМ;

δ_2 , [мм] – толщина детали из ПКМ;

d , [мм] – диаметр КЭ;

$(\sigma_{adm})_{2cm}$, [МПа] – допускаемое напряжение смятия детали из ПКМ.

Условие прочности на разрушение от КЭ до края детали (или до следующего ряда КЭ)

В дискретных соединениях обычно рассматривают это условие прочности, однако, при расчете клеештифтовых соединений на срез его можно не учитывать, если отношение расстояния между рядами КЭ t (или до края детали t' , рисунок 14) и диаметра КЭ d подчиняется ограничению:

$$\frac{t'(t)}{d} \geq 2,8 \div 6 \quad (2.4)$$

Разрушение деталей по ослабленному сечению

Ослабленным сечением является сечение в месте расположения КЭ. Условие прочности имеет вид:

$$\sigma_{pi} = \frac{N_i}{A_i} = \frac{N_i}{\delta_i (b_i - m_i d_i)} \leq [\sigma_{adm}]_{pi}, \quad (2.5)$$

где N_i – продольная внутренняя сила растяжения (сжатия);

A_i – площадь соединяемой детали в опасном сечении;

b_i, δ_i – ширина и толщина соединяемых деталей;

m – число КЭ в одном поперечном ряду (на рисунке 14 показаны продольные ряды КЭ);

$[\sigma_{adm}]_{pi}$ – допускаемое напряжение при растяжении (сжатии) материала деталей;

i – номер исследуемой детали (в условиях диссертационного исследования 1 – стальная деталь, 2 – деталь из ПКМ).

Уточнение условия прочности на срез КЭ при расчете соединения типа «нахлестка»

Основным при проектировании изучаемого соединения является расчет КЭ на срез на основе выражения (2.1), в котором необходимо учитывать как расположение КЭ относительно оси, совпадающей с линией действия растягивающих сил F , при помощи коэффициента K_p , так и податливость КЭ, которую обозначим аналогично [98] C_n , где n – количество и номер КЭ в продольном ряду.

Коэффициент перенапряжения

$$K = \frac{Q_{\max}}{F}, \quad (2.6)$$

где Q_{\max} – максимальная расчетная поперечная сила в КЭ.

Воспользуемся методом сил для определения поперечной силы в каждом КЭ – Q_i и вывода уточненной формулы расчета КЭ на срез. Основная система (ОС) метода сил для заданной системы (рисунок 14а) приведена на рисунке 15.

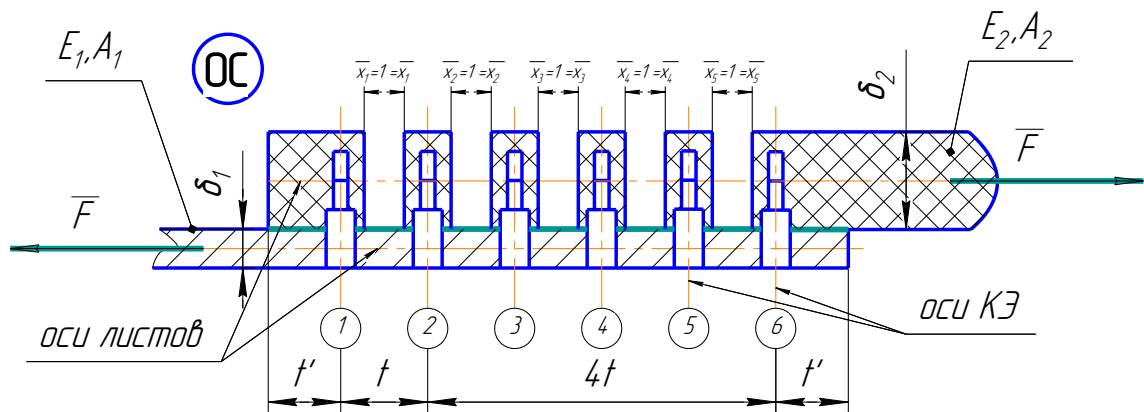


Рисунок 15 – Основная система метода сил при шести КЭ

Разрезая пять замкнутых контуров, получим пятнадцать раз статически неопределимую систему, при этом внутренние поперечные силы Q_i и изгибающие моменты M_i учтем податливостью связей (КЭ) и самих листов 1 и 2. Тогда основополагающими значениями при подсчете неизвестных в системе канонических уравнений метода сил будут внутренние продольные силы N_i . ОС станет пять раз статически неопределимой (учитываются только продольные $X_{1+5} = 1$).

При определении податливости КЭ заменим площади продольных сечений листов стали и композита на рисунке 15 их осями, соединив последние с осями КЭ для удобства построения эпюр продольных сил N_{1+5}, N_F (рисунок 16), изгибающих моментов M_{1+5}, M_F (рисунок 17).

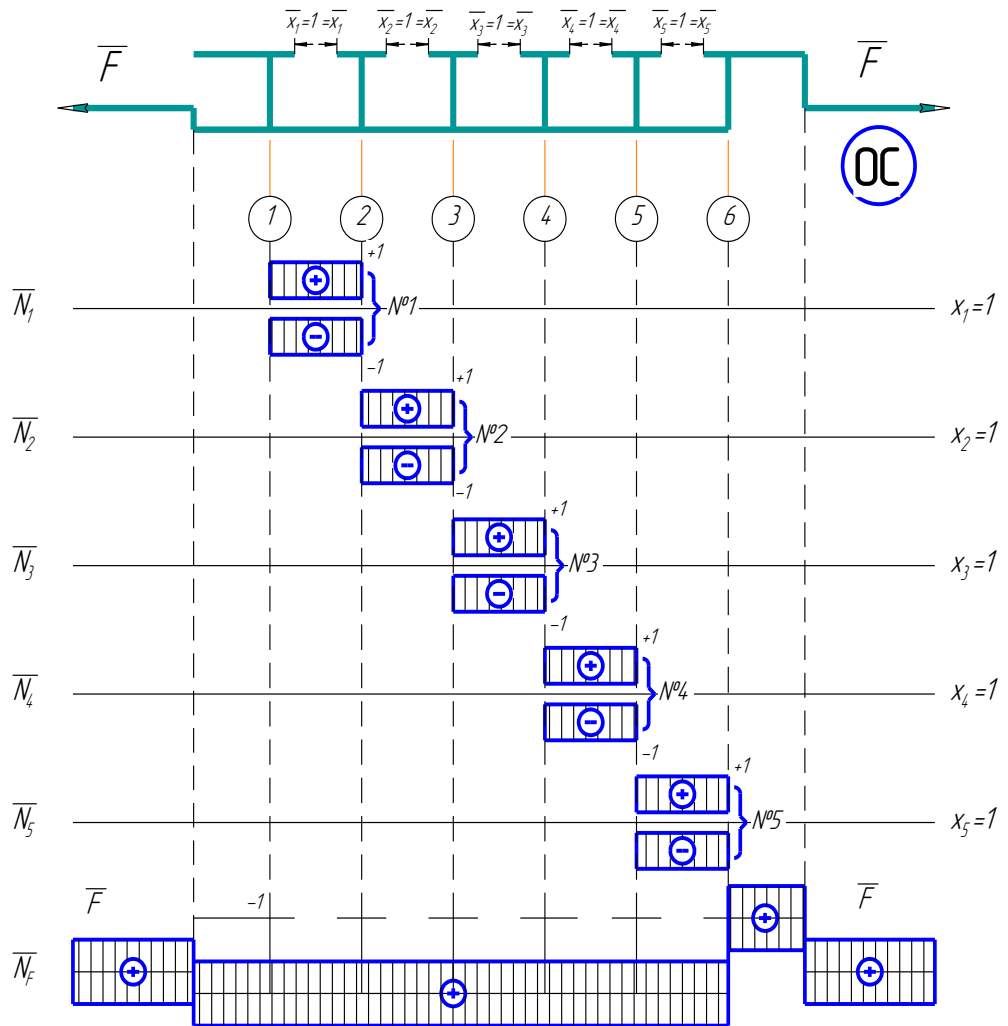


Рисунок 16 – Упрощенная ОС и эпюры $N_{1\div 5}$, N_F

Эпюру поперечной силы Q_1 учтем в податливости первого КЭ, остальные эпюры $Q_2 \div Q_5$ и Q_F не участвуют в определении податливости.

Метод сил позволяет получить трехдиагональную матрицу, для соединения «нахлестка» с любым количеством КЭ. В общей форме уравнение запишется в виде:

$$\delta_{k,k-1} \cdot x_{k-1} + \delta_{k,k} \cdot x_k + \delta_{k,k+1} \cdot x_{k+1} = -\Delta_{kP}, \quad (2.7)$$

где $k = n - 1$, количество участков, на которое разделяется всеми n КЭ поверхность стыка, значения коэффициентов δ_{ij} определяются по формуле:

$$\delta_{ij} = \sum_{i,j=1}^n \int \frac{N_i N_j}{E_i A_i} ds + \sum_i^{i+1} C_i, \quad (2.8)$$

где первое слагаемое $\sum_{i,j=1}^n \int \frac{N_i N_j}{E_i A_i} ds$ будет приближенно определяться способом

Верещагина,

а второе $\sum_i^{i+1} C_i = \sum_{i,j=1}^n \int \frac{M_i M_j}{E_i J_i} ds$ – на основе методики, предложенной Степиным П.А.

[98].

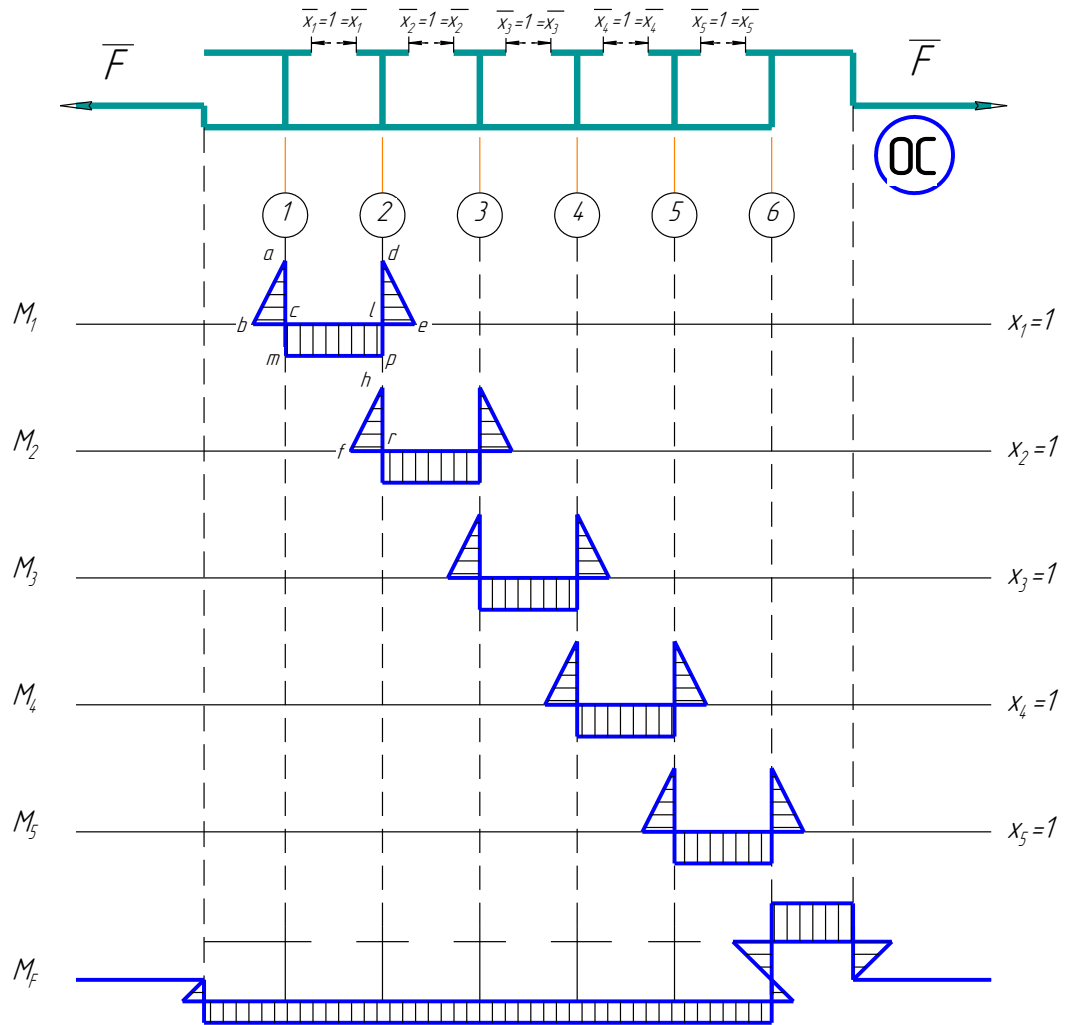


Рисунок 17 – Упрощенная ОС и эпюры $M_{1 \div 5}$, M_F

При условном перемножении эпюр M_1 и M_1 при нахождении коэффициента δ_{11} (рисунок 17) для КЭ с номерами 1 и 2 получаем положительные значения податливости C_1 и C_2 (знак C_1 или C_2 определяется по знаку условно перемноженных эпюр abc на abc и del на del соответственно,

часть эпюры $clmp$ не учитывается, т.к. податливость листа уже учтена). При нахождении, например, коэффициента δ_{12} податливость отрицательна ($-C_2$), т.к. при условном перемножении M_1 и M_2 эпюра del и эпюра hfr имеют противоположные знаки. При нахождении коэффициента Δ_{5F} учитываем, что $\delta_1 > 0,5\delta_2$, тогда при условном перемножении эпюры M_5 и грузовой эпюры M_F податливость положительна ($+C_6$).

Учитывая все вышесказанное, например, для δ_{11} , путем перемножения эпюры N_1 на N_1 (рисунок 16) и, учитывая податливость крепежных элементов C_1 и C_2 будет иметь:

$$\delta_{11} = \frac{1}{E_1 A_1} [(+1) \cdot t \cdot (+1)] + \frac{1}{E_2 A_2} [(-1) \cdot t \cdot (-1)] + C_1 + C_2 = \Pi_1 + \Pi_2 + C_1 + C_2, \quad (2.9)$$

где $\Pi_1 = \frac{t}{E_1 A_1}, \left[\frac{мм}{H} \right]$ – податливость детали 1 на участке между связями;

$\Pi_2 = \frac{t}{E_2 A_2}, \left[\frac{мм}{H} \right]$ – податливость детали 2 на участке между связями;

E_1, E_2 – модуль Юнга материала деталей 1 и 2 соответственно;

$A_1 = \delta_1 b_1, A_2 = \delta_2 b_2$ – площади поперечных сечений деталей 1 и 2 (b_1, b_2 – ширина деталей 1 и 2 соответственно);

t – шаг КЭ в продольном ряду;

$C_n, \left[\frac{мм}{H} \right]$ ($n = 1 \div 6$) – податливость n -ой связи (КЭ).

Так как все связи представляют собой одинаковые по материалу и геометрии КЭ, будем считать, что $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C$.

Из [65]

$$C = \frac{C_{\Pi}}{A_{КЭ}}, \quad (2.10)$$

где $C_{\Pi}, \left[\frac{мм^3}{H} \right]$ – коэффициент податливости КЭ (зависит от формы КЭ);

$A_{KЭ}$ – площадь поперечного сечения цилиндрической части КЭ; $A_{KЭ} = \frac{\pi d^2}{4}$.

Система канонических уравнений метода сил для ОС на рисунке 15 будет:

$$\begin{cases} \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \delta_{13}X_3 + \delta_{14}X_4 + \delta_{15}X_5 + \Delta_{1F} = 0, \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \delta_{23}X_3 + \delta_{24}X_4 + \delta_{25}X_5 + \Delta_{2F} = 0, \\ \delta_{31}X_1 + \delta_{32}X_2 + \delta_{33}X_3 + \delta_{34}X_4 + \delta_{35}X_5 + \Delta_{3F} = 0, \\ \delta_{41}X_1 + \delta_{42}X_2 + \delta_{43}X_3 + \delta_{44}X_4 + \delta_{45}X_5 + \Delta_{4F} = 0, \\ \delta_{51}X_1 + \delta_{52}X_2 + \delta_{53}X_3 + \delta_{54}X_4 + \delta_{55}X_5 + \Delta_{5F} = 0. \end{cases} \quad (2.11)$$

Обозначив $\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 + 2C$ с учетом (2.9), запишем коэффициенты канонических уравнений (с ограничением $\delta_1 > 0,5\delta_2$):

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= \delta_{22} = \delta_{33} = \delta_{44} = \delta_{55} = \Pi, \\ \delta_{12} &= \delta_{21} = \delta_{23} = \delta_{32} = \delta_{34} = \delta_{43} = \delta_{45} = \delta_{54} = -C, \\ \delta_{13} &= \delta_{14} = \delta_{15} = \delta_{24} = \delta_{25} = \delta_{31} = \delta_{35} = \delta_{41} = \delta_{42} = \delta_{51} = \delta_{52} = \delta_{53} = 0, \\ \Delta_{1F} &= \Delta_{2F} = \Delta_{3F} = \Delta_{4F} = F\Pi_1, \\ \Delta_{5F} &= F(\Pi_1 + C). \end{aligned} \quad (2.12)$$

Подставив их в (2.11), получим:

$$\begin{cases} \Pi X_1 + (-C)X_2 + 0 \cdot X_3 + 0 \cdot X_4 + 0 \cdot X_5 = -F\Pi_1, \\ (-C)X_1 + \Pi X_2 + (-C)X_3 + 0 \cdot X_4 + 0 \cdot X_5 = -F\Pi_1, \\ 0 \cdot X_1 + (-C)X_2 + \Pi X_3 + (-C)X_4 + 0 \cdot X_5 = -F\Pi_1, \\ 0 \cdot X_1 + 0 \cdot X_2 + (-C)X_3 + \Pi X_4 + (-C)X_5 = -F\Pi_1, \\ 0 \cdot X_1 + 0 \cdot X_2 + 0 \cdot X_3 + (-C)X_4 + \Pi X_5 = -F(\Pi_1 + C). \end{cases} \quad (2.13)$$

Очевидно, что ненулевые коэффициенты находятся на главной и двух ближайших диагоналях (тредиагональная система). Исследование структуры

уравнений (2.13) показывает, что в общем виде канонические уравнения будут иметь следующий вид:

для один раз статически неопределимой системы (два КЭ в ряду)

$$PX_1 = -F(\Pi_1 + C); \quad (2.14)$$

для k раз статически неопределимой системы (при n КЭ в ряду, $k = n - 1$)

$$\begin{cases} PX_1 + (-C)X_2 + 0 \cdot X_3 + \dots + 0 \cdot X_k = -F\Pi_1, \\ (-C)X_1 + PX_2 + (-C)X_3 + \dots + 0 \cdot X_k = -F\Pi_1, \\ 0 \cdot X_1 + (-C)X_2 + PX_3 + \dots + 0 \cdot X_k = -F\Pi_1, \\ \dots \\ 0 \cdot X_1 + 0 \cdot X_2 + \dots + (-C)X_{k-1} + PX_k = -F(\Pi_1 + C). \end{cases} \quad (2.15)$$

Таким образом, для металло-композитного соединения типа «нахлестка» построена система канонических уравнений (2.15), в которой определены все коэффициенты.

Решая последнюю, например, способом Гаусса с использованием процедуры Холецкого (Cholesky Decomposition) можно найти неизвестные $X_1 \div X_k$, а с их помощью - перерезывающие силы, действующие на КЭ, и провести расчет на прочность по наиболее нагруженному КЭ:

$$\begin{cases} Q_1 = X_1; \\ Q_2 = X_2 - X_1; \\ Q_3 = X_3 - X_2; \\ \dots \\ Q_n = F - X_k. \end{cases} \quad (2.16)$$

Для максимального $Q_i = Q_{\max}$ находим коэффициент перенапряжения согласно (2.6). Окончательно, условие прочности на срез КЭ (2.1) примет вид:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{KQ_{\text{ср}}}{K_p A} \leq \tau_{\text{adm}} \quad (2.17)$$

Уточнение условия прочности на срез КЭ при расчете соединения типа «пакет»

Воспользуемся методом сил, изложенным ранее. ОС метода сил для заданной системы (рисунок 14, б) приведена на рисунке 18.

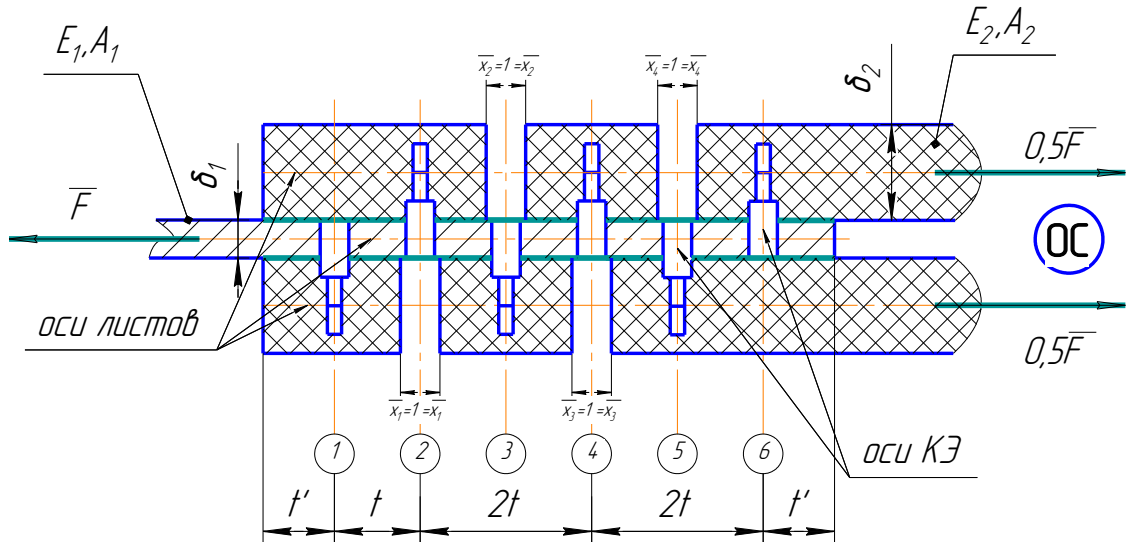


Рисунок 18 – Основная система метода сил при шести КЭ

Разрезая четыре замкнутых контура, получим двенадцать раз статически неопределимую систему, при этом внутренние поперечные силы Q_i и изгибающие моменты M_i учтем податливостью связей (КЭ) и самих листов 1 и 2. Тогда основополагающими значениями при подсчете неизвестных в системе канонических уравнений метода сил будут внутренние продольные силы N_i . ОС станет четыре раза статически неопределимой (учитываются только продольные $X_{1\div 4} = 1$).

При определении податливости КЭ заменим площади продольных сечений листов стали и композита на рисунке 18 их осями, соединив последние с осями КЭ для удобства построения эпюр продольных сил $N_{1\div 4}, N_F$ (рисунок 19), изгибающих моментов $M_{1\div 4}, M_F$ (рисунок 20).

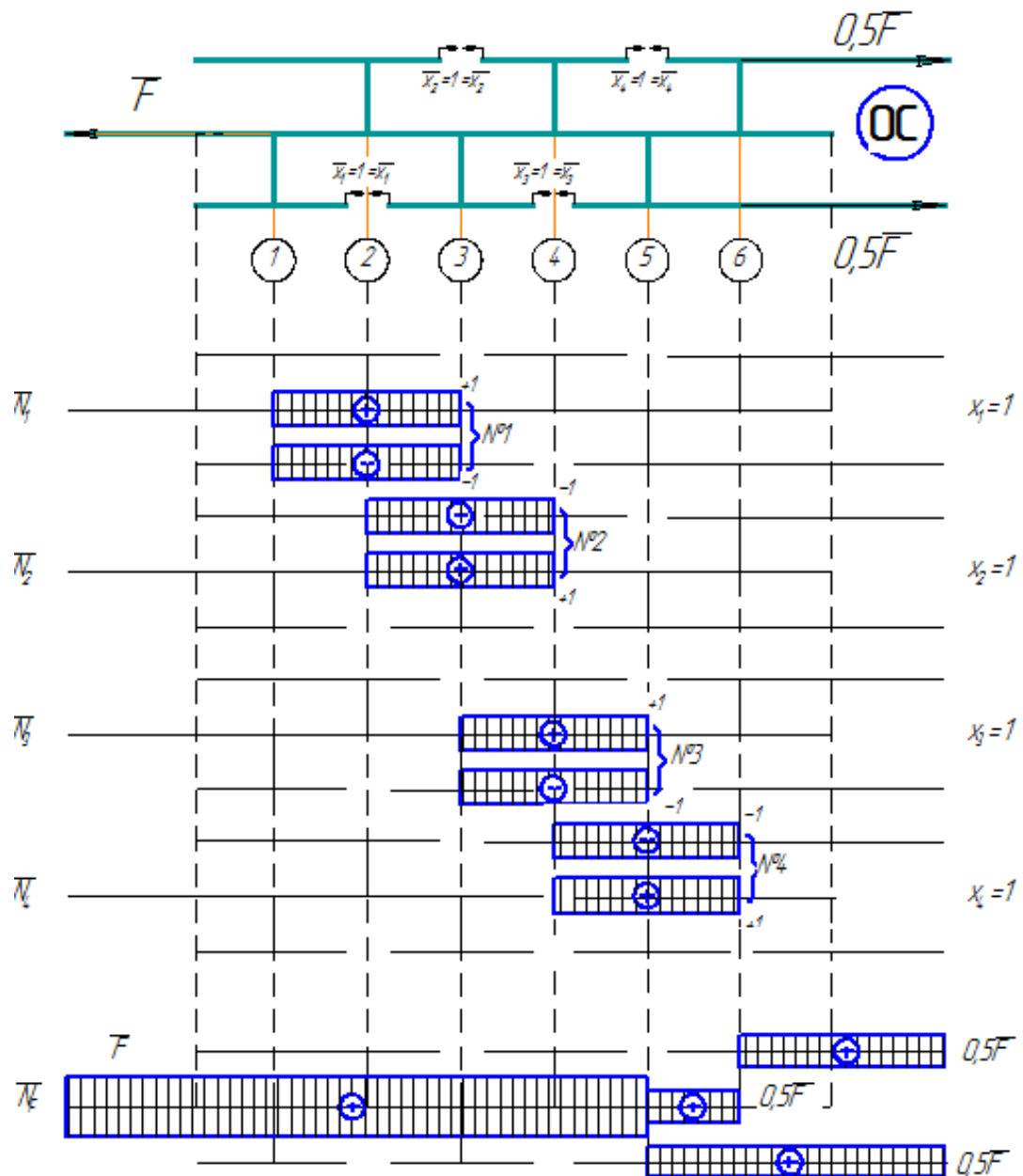


Рисунок 19 – Упрощенная ОС и эпюры $N_{1:4}$, N_F

Эпюры поперечных сил $Q_1 \div Q_5$ и Q_F по аналогии с соединением «нахлестка» не участвуют в определении податливости. Коэффициенты системы канонических уравнений определяются согласно (2.8).

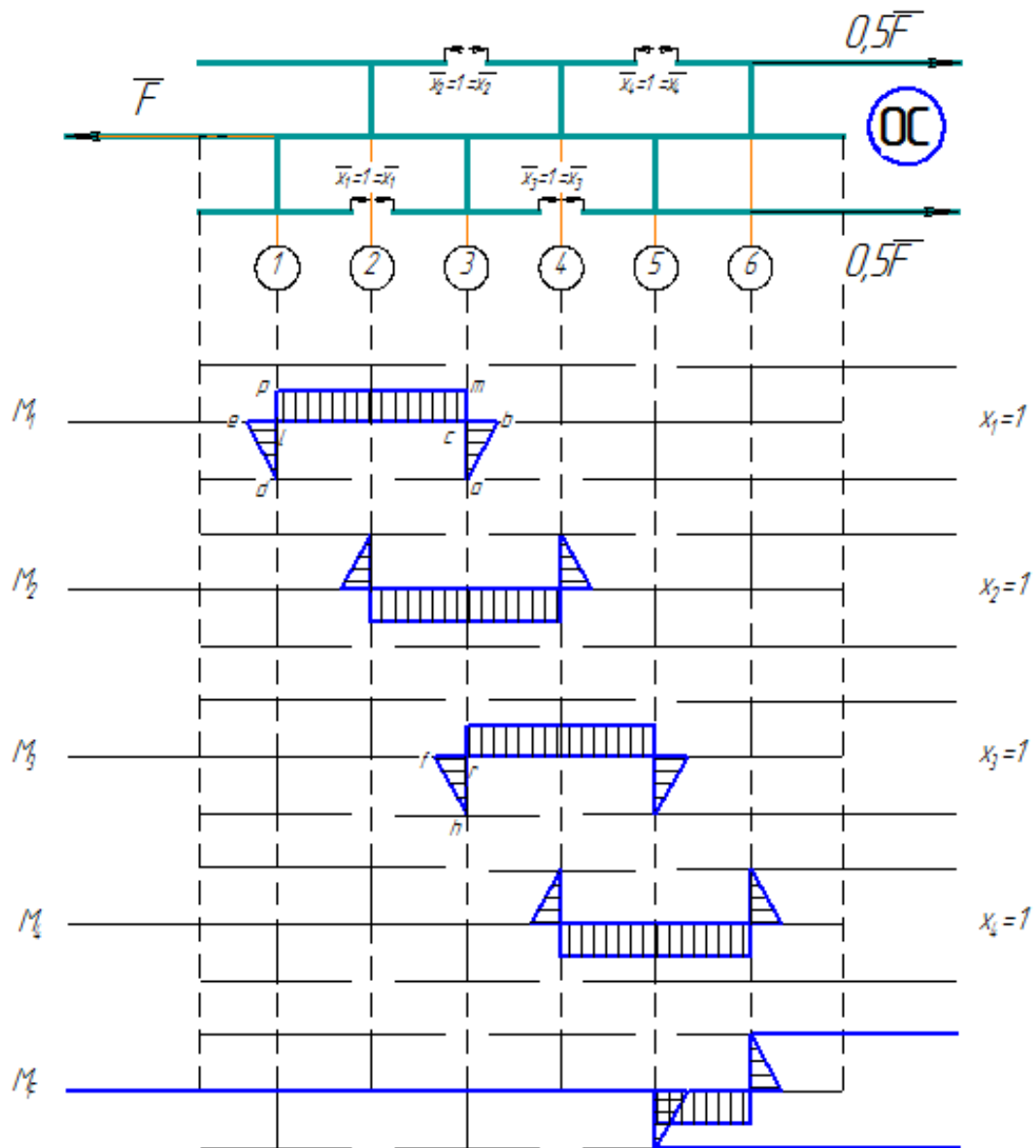


Рисунок 20 – Упрощенная ОС и эпюры M_{1-4} , M_F

При условном перемножении эпюр M_1 и M_1 (рисунок 20) для КЭ с номерами 1 и 3 получаем положительные значения податливости C_1 и C_3 (знак C_1 или C_3 определяется по знаку условно перемноженных эпюр abc на abc и del на del соответственно, часть эпюры $clmp$ не учитывается, т.к. податливость листа уже учтена). При нахождении, например, коэффициента δ_{13} податливость отрицательна ($-C_3$), т.к. при условном перемножении M_1 и M_3 эпюра abc и эпюра hfr имеют противоположные знаки.

Итак, определим δ_{11} , путем перемножения эпюры N_1 на N_1 (рисунок 19) и, учитывая податливость крепежных элементов C_1 и C_3 :

$$\delta_{11} = \frac{1}{E_1 A_1} [(+1) \cdot 2t \cdot (+1)] + \frac{1}{E_2 A_2} [(-1) \cdot 2t \cdot (-1)] + C_1 + C_3 = 2(\Pi_1 + \Pi_2) + C_1 + C_3, \quad (2.18)$$

где $2t$ – шаг КЭ в продольном ряду с одной стороны (см. рисунок 18).

Система канонических уравнений метода сил для ОС на рисунке 18 будет:

$$\begin{cases} \delta_{11} X_1 + \delta_{12} X_2 + \delta_{13} X_3 + \delta_{14} X_4 + \Delta_{1F} = 0; \\ \delta_{21} X_1 + \delta_{22} X_2 + \delta_{23} X_3 + \delta_{24} X_4 + \Delta_{2F} = 0; \\ \delta_{31} X_1 + \delta_{32} X_2 + \delta_{33} X_3 + \delta_{34} X_4 + \Delta_{3F} = 0; \\ \delta_{41} X_1 + \delta_{42} X_2 + \delta_{43} X_3 + \delta_{44} X_4 + \Delta_{4F} = 0. \end{cases} \quad (2.19)$$

С учетом (2.18) и $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C$, запишем коэффициенты канонических уравнений:

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= \delta_{22} = \delta_{33} = \delta_{44} = 2(\Pi_1 + \Pi_2 + C); \\ \delta_{13} &= \delta_{31} = \delta_{24} = \delta_{42} = -C; \\ \delta_{12} &= \delta_{21} = \delta_{23} = \delta_{32} = \delta_{34} = \delta_{43} = \Pi_1; \\ \delta_{14} &= \delta_{41} = 0; \\ \Delta_{1F} &= \Delta_{2F} = 2F\Pi_1; \\ \Delta_{3F} &= 0,5(4\Pi_1 + C)F; \\ \Delta_{4F} &= 0,5(3\Pi_1 + C)F. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Подставив их в (2.19), получим:

$$\begin{cases} 2(\Pi_1 + \Pi_2 + C)X_1 + \Pi_1 X_2 + (-C) \cdot X_3 + 0 \cdot X_4 = -2F\Pi_1; \\ \Pi_1 X_1 + 2(\Pi_1 + \Pi_2 + C)X_2 + \Pi_1 X_3 + (-C) \cdot X_4 = -2F\Pi_1; \\ (-C) \cdot X_1 + \Pi_1 X_2 + 2(\Pi_1 + \Pi_2 + C)X_3 + \Pi_1 X_4 = -0,5(4\Pi_1 + C)F; \\ 0 \cdot X_1 + (-C) \cdot X_2 + \Pi_1 X_3 + 2(\Pi_1 + \Pi_2 + C)X_4 = -0,5(3\Pi_1 + C)F. \end{cases} \quad (2.21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_1 = X_1, \\ Q_2 = X_2, \\ Q_3 = X_3 - X_1, \\ Q_4 = X_4 - X_2, \\ \dots\dots\dots \\ Q_{n-1} = 0,5F - X_{k-1}, \\ Q_n = 0,5F - X_k. \end{array} \right. \quad (2.24)$$

Для максимального $Q_i = Q_{\max}$ находим коэффициент перенапряжения согласно (2.6). Окончательно, условие прочности на срез КЭ (2.1) примет вид (2.17).

Разрушение адгезионного соединения листов ПКМ со стальным листом

Прочность адгезионного соединения склеенных листов ПКМ со стальным листом при осевом нагружении (рисунок 14) в первом приближении можно определить по формуле

$$\tau_K = \frac{F_K}{A_K} \leq \tau_{Kadm}, \quad (2.25)$$

где τ_K - касательные напряжения в слое клея 4;

F_K - сдвигающая листы сила;

$A_K = \left(b \cdot l - n \frac{\pi d^2}{4} \right)$ - площадь склеивания,

l, b - длина и ширина склеенных частей деталей 1 и 2;

τ_{Kadm} - допускаемое напряжение клея на срез.

Результаты расчета

Итак, простейшей методикой прочностного расчета изучаемого соединения, нагруженного осевой срезающей силой, для дальнейшего его

проектирования может служить система алгебраических выражений (2.17), (2.2), (2.3), (2.5), (2.25):

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{cp} = \frac{KQ_{cp}}{K_p A} \leq \tau_{adm}, \\ \sigma_{1cm} = \frac{N_1}{\delta_1 \cdot d} \leq (\sigma_{adm})_{1cm}, \\ \sigma_{2cm} = 325 - 25 \cdot \frac{d}{\delta_2} \leq (\sigma_{adm})_{2cm}, \\ \sigma_{pi} = \frac{N_i}{\delta_i (b_i - m_i d_i)} \leq (\sigma_{adm})_{pi}, \\ \tau_K = \frac{F_K}{A_K} \leq \tau_{Kadm}, \end{array} \right. \quad (2.26)$$

с ограничениями: отношение $\frac{t(t')}{d} \geq 2,8...6$.

Для соединения типа «пакет» вводятся дополнительные ограничения: число КЭ в верхнем и нижнем рядах одинаково и общее число КЭ n – четное, для нечетного n коэффициенты системы канонических уравнений (2.23) изменятся.

Вывод: предложена простая методика расчета разрабатываемого соединения на срез. Однако, расчет требует уточнений после проведения серии экспериментов по выяснению лучшей формы КЭ, а также геометрии соединения. Кроме того, необходимо ввести аналитическое выражение, позволяющее выполнить проектировочный расчет для определения нормального усилия, выдергивающего КЭ из тела ПКМ, которое не приведено в теоретической части исследования в связи с отсутствием эмпирических данных.

3. Методика экспериментальных исследований

3.1. Общая методика исследований

Для решения задач, сформулированных в диссертации, составлена общая схема теоретических и экспериментальных исследований (рисунок 21).

В зависимости от цели исследования при установлении полных и точно сформулированных условий эксперимента следует учитывать следующие факторы: материал, тип нагружения, образец, испытательная машина, окружающая среда (как правило, окружающая среда не требует особого внимания, исключением являются коррозионные и высокотемпературные испытания) и методика проведения [99].

Материалы:

- ПКМ на основе стеклоткани Т-10 ГОСТ 19170-73 и эпоксидной смолы ЭД-6 по ГОСТ 10587-84 с соответствующими добавками (пластификатор – ДБФ, отвердитель – ПЭПА);
- ультрадисперсные порошки бемита $Al(OOH)$ ТУ 2133-001-58849237-2003 и корунда Al_2O_3 ;
- металлические части конструкций соединений выполнены из стали 3 ГОСТ 380-94.

В экспериментальных исследованиях применены современное измерительное и испытательное оборудование, установки и стенды промышленного производства, приспособления оригинальной конструкции.

Измерения размеров образцов проводились микрометром МК 25 – 1 ГОСТ 6507 - 90 и штангенциркулем ШЦ-1-125-0,1 ГОСТ 166-89.

Исследования проводились при комнатной температуре 24-25°C, по частным методикам, приведенным ниже.

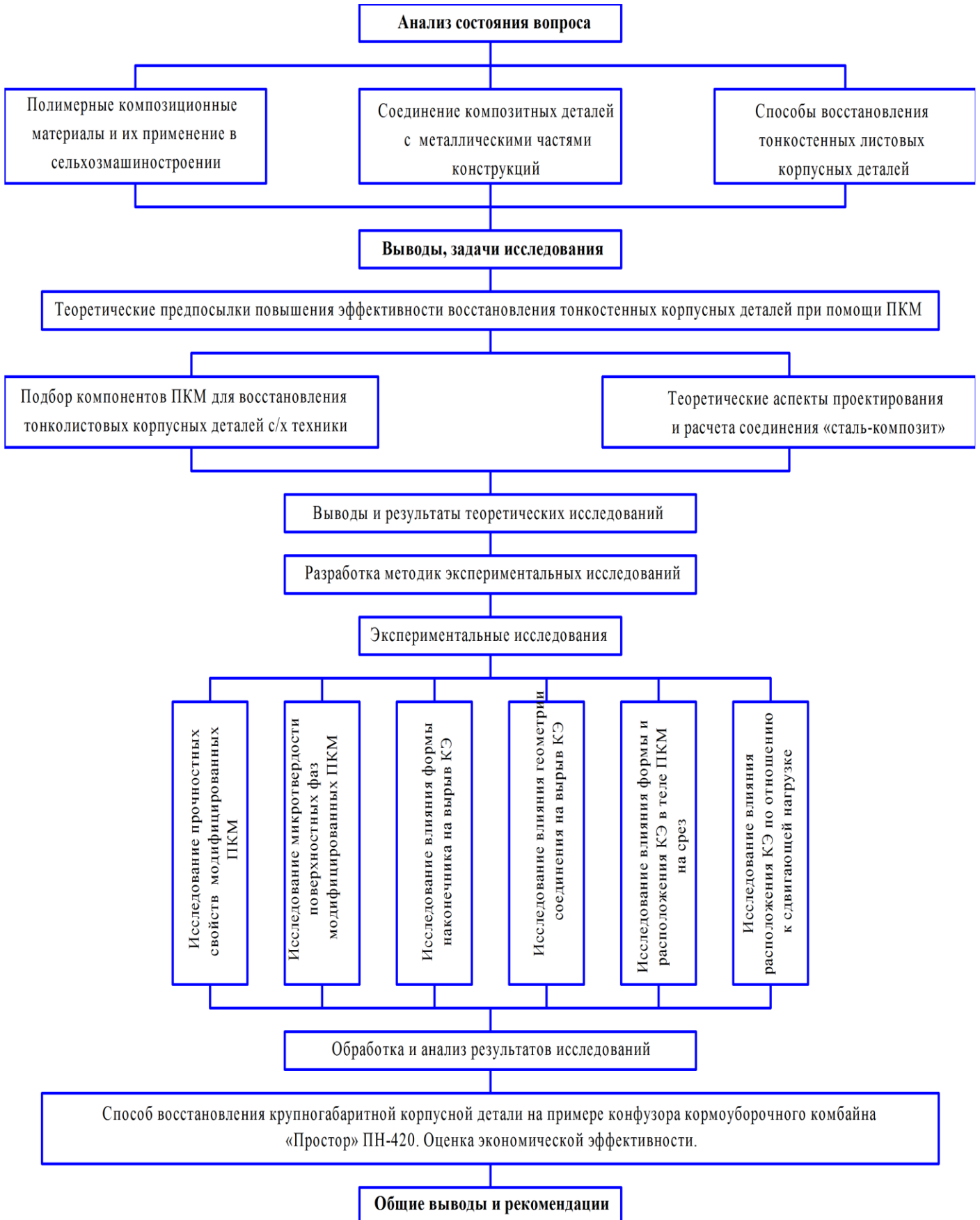


Рисунок 21 – Общая схема исследований

3.2. Методика изучения прочностных свойств ПКМ

Для определения механических характеристик, предлагаемых ПКМ было проведено лабораторное тестирование на растяжение. Этот вид нагружения является одноосным и однородным. Образец должен иметь простую форму, лучше стандартизованную [99]. Целью упрощения формы образцов является повышение идентичности изготавливаемых образцов и улучшение контроля факторов, влияющих на результаты проводимого тестирования, это не только форма, но и абсолютные размеры образца, наличие концентраторов напряжений и состояние поверхности [100]

3.2.1. Объект изучения

1. В качестве объекта изучения выбраны плоские образцы без головок для исключения подреза волокон стеклоткани. При этом $h \geq 1\text{мм}$, $b \geq 20 \pm 1\text{мм}$, $l = 200\text{мм}$, согласно ГОСТ 25.601 - 80, (рисунок 22).

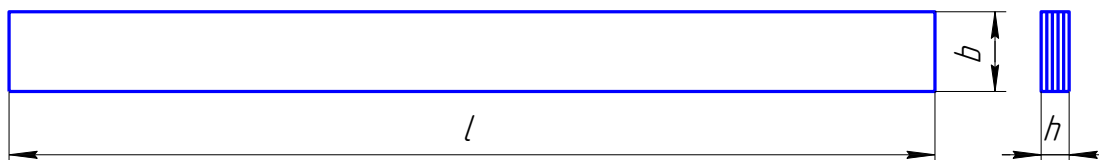
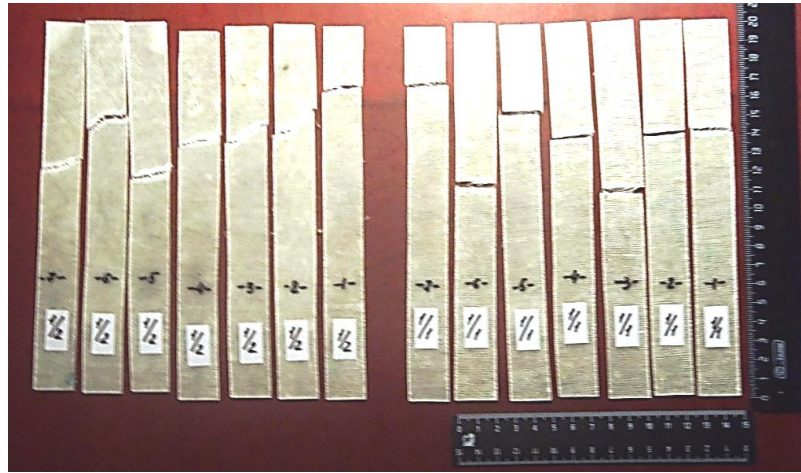
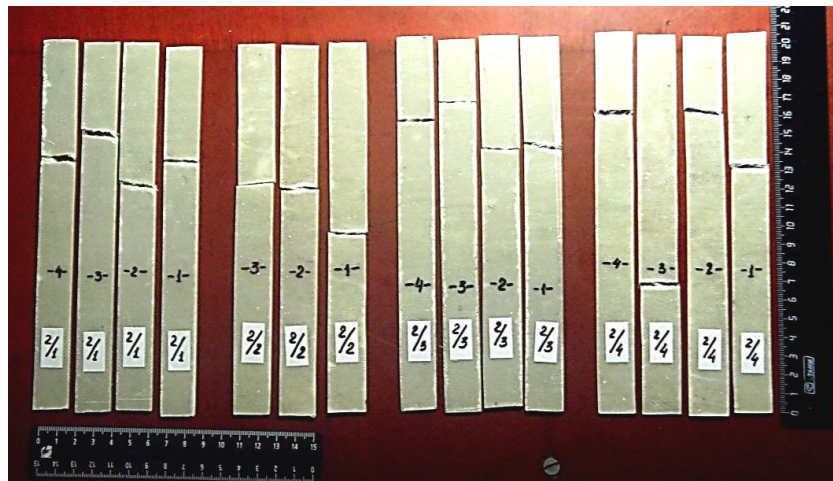


Рисунок 22 – Образец для проведения эксперимента на растяжение

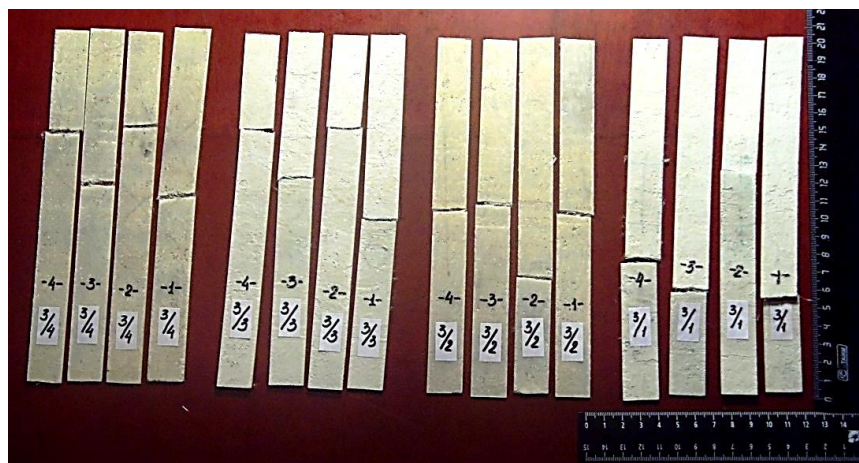
2. Для проведения лабораторного тестирования были изготовлены плоские образцы (рисунок 22, 23) на основе стеклоткани Т-10 ГОСТ 19170-73 и эпоксидной смолы ЭД-6 по ГОСТ 10587-84 с соответствующими добавками (пластификатор – ДБФ, отвердитель – ПЭПА).
 - 2.1. Образцы без добавок – 1 группа,
 - 2.2. Образцы с добавлением в смолу бемита – 2 группа,
 - 2.3. Образцы с добавлением в смолу корунда – 3 группа.



а)



б)



в)

Рисунок 23– Представители образцов из ПКМ: а) группа 1 – связующее С, б) группа 2 – связующее С+ Al(OOH), в) группа 3 – связующее С+ Al₂O₃

Характеристики образцов в зависимости от наличия нанодобавок, взаимного расположения однонаправленных слоев и наличия покрытия занесены в таблицу 2.

Таблица 2 – Характеристики образцов из ПКМ

№	кол-во слоев	Расположение слоев	добавки	Примечания
1/1	5	$0^0 \times 0^0 \times 0^0 \times 0^0 \times 0^0$	нет	все слои пропитываются смолой
1/2	5	$0^0 \times 45^0 \times 0^0 \times -45^0 \times 0^0$	нет	
2/1	5	$0^0 \times 0^0 \times 0^0 \times 0^0 \times 0^0$	Бемит (AL(OOH))	все слои пропитываются смолой с добавлением бемита
2/2	5	$0^0 \times 0^0 \times 0^0 \times 0^0 \times 0^0$	Бемит (AL(OOH))	с добавлением бемита выполняется только покрытие образца
2/3	5	$0^0 \times 45^0 \times 0^0 \times -45^0 \times 0^0$	Бемит (AL(OOH))	все слои пропитываются смолой с добавлением бемита
2/4	5	$0^0 \times 45^0 \times 0^0 \times -45^0 \times 0^0$	Бемит (AL(OOH))	с добавлением бемита выполняется только покрытие образца
3/1	5	$0^0 \times 0^0 \times 0^0 \times 0^0 \times 0^0$	Корунд(Al ₂ O ₃)	все слои пропитываются смолой с добавлением корунда
3/2	5	$0^0 \times 0^0 \times 0^0 \times 0^0 \times 0^0$	Корунд(Al ₂ O ₃)	с добавлением корунда выполняется только покрытие образца
3/3	5	$0^0 \times 45^0 \times 0^0 \times -45^0 \times 0^0$	Корунд(Al ₂ O ₃)	все слои пропитываются смолой с добавлением корунда
3/4	5	$0^0 \times 45^0 \times 0^0 \times -45^0 \times 0^0$	Корунд(Al ₂ O ₃)	с добавлением корунда выполняется только покрытие образца

Перед пропиткой производилась расшлихтовка стеклоткани уайт-спиритом ГОСТ 3134-78 с последующей сушкой при температуре 60-80 °С, после пропитки и частичной полимеризации получался так называемый аппретированный препрег. Образцы выпиливались из заготовки слоистой пластины, которая изготавливалась способом ручной выкладки, следующим образом:

- на гладкую деревянную цулагу крепилась полиэтиленовая пленка для предотвращения склеивания пластины с поверхностью цулаги;
- затем последовательно укладывались пять слоев стеклоткани (расположение слоев $0^0 \times 0^0 \times 0^0 \times 0^0 \times 0^0$, либо $0^0 \times 45^0 \times 0^0 \times -45^0 \times 0^0$), пропитанные связующим или связующим с добавками в соотношении компонентов 60% связующего и 40% добавок (соотношение компонентов выбрано по технологическим соображениям)²³, для придания текучести этой смеси использовался растворитель – ацетон ГОСТ 2768-84
- на поверхность пластины накладывался слой перфорированной полиэтиленовой пленки, поглощающий слой из байковой ткани, сплошная пленка и деревянная цулага с грузом $P = 320H$.

Ацетон при взаимодействии со смолой начинал действовать как отвердитель. В смоле происходил процесс ускоренной полимеризации, поэтому толщина образцов с добавлением порошков несколько увеличена.

При выполнении образцов с внесением добавок только в покрытие, последнее наносилось непосредственно на полиэтиленовую пленку, после чего на нее укладывался первый слой стеклоткани. Полимеризация пластины длилась 48 часов. Затем полученные образцы подвергались механической обработке – фрезерованию по торцам. Тестирование проводилось не ранее чем через 16 часов после изготовления [100].

3.2.2. Цель

Целью являлось определение пределов прочности исследуемых ПКМ в зависимости от присутствия ультрадисперсных порошков бемита $Al(OOH)$ или корунда Al_2O_3 , количества слоев, пропитанных с добавлением этих порошков, и взаимной ориентацией волокон однонаправленных слоев композита.

²³ Данное соотношения является оптимальным для органических частиц, переносимых струей воздуха (измельченной травяной массы), по данным исследований свойств ПКМ на базе Государственного Научного центра РФ ОАО «ОНПП» Технология [92].

3.2.3. Общие положения

1. Нагружение образцов при проведении лабораторного тестирования осуществлялось вдоль оси образцов растягивающей нагрузкой.
2. Исследование проводилось на электромеханической испытательной машине серии LFM 20 – 100 кН – LFM – 100 (ISO 7500-1, класс 0,5) в центральной заводской лаборатории ОАО «КТЗ», г. Калуга, РФ (технические характеристики машины см. приложение Б).
3. Измерение усилия проводилось фирменным датчиком силы (при нагрузке меньше 1кН погрешность измерений соответствует 1%, выше 1 кН – 0,5%).
4. Перед проведением эксперимента измерялись ширина и толщина рабочей части образцов в трех местах: по краям и в середине. Средние значения записывались и по ним, с точностью до трех значащих цифр, определялась площадь поперечного сечения образца, результаты сведены в таблицу Б.2, приложения Б.
5. Время нагружения образца соответствовало фиксированной скорости перемещения захватов машины $V=5\text{мм/мин}$ [100].
6. За факт разрушения принималось видимое нарушение целостности образца.
7. Прием сигналов, их обработка, запись и вывод текущей информации на монитор компьютера в режиме реального времени выполнялось программой DION.stat, поставляемой производителем испытательной машины, Швейцария.

3.2.4. Объем

Проведена серия экспериментов до получения удовлетворительных результатов для 7 образцов в каждой подгруппе, при разрушении образца вне рабочей зоны (в губках машины), результат не учитывался, а образец изымался [100].

3.2.5. Условия проведения

1. Закрепление образцов проводилось в плоских клиновых захватах, с насечкой зажимных губок (рисунок 2Б, б, приложение Б), практически исключая проскальзывание и раздавливание закрепляемых концов образца, а также обеспечивающих осесимметричное приложение растягивающей нагрузки к образцу.
2. Эксперимент проводился при фиксированной скорости перемещения захватов машины $V=5\text{мм/мин}$ (задавалось и поддерживалось системой управления машины LFM – 100).
3. На каждом образце в процессе исследований производился непрерывный визуальный контроль состояния (целостности).

3.2.6. Результаты

При проведении лабораторного тестирования осуществлялось монотонное нагружение без выдержек напряжений на заданном уровне (при таком характере нагружения образца усталость материала не проявляется) в итоге записывались диаграммы деформирования образцов ПКМ (графическая запись зависимости напряжения от деформации испытуемого образца). Учитывая, что рекомендуемая скорость перемещения подвижного захвата машины 5-20 мм/мин [100], а скорость распространения волн в стеклообразных полимерных материалах составляет до 1000 м/с [101], выбранная скорость обеспечила равномерное распределение напряжений по объему образца.

Прочность образцов σ_{ϵ} определяли по формуле [99]:

$$\sigma_{\epsilon} = \frac{F_{\max}}{b \cdot h}, \quad (3.1)$$

где F_{\max} – разрушающая нагрузка, Н;

$A = b \cdot h$ – площадь поперечного сечения образца, мм².

Обработка полученных данных проводилась в следующей последовательности [102-107]:

1. Исключение промахов.
2. Установление закона распределения случайной величины.
3. Проверка дисперсий полученных выборок на однородность (тест на равенство среднеквадратичных отклонений (СКО)).
4. Тест на равенство средних, анализ результатов эксперимента.

Определенные величины пределов прочности исследуемых ПКМ статистически обрабатывались по стандартным методикам с использованием программы Minitab 17.

Для изучения степени влияния различных факторов на предел прочности образцов, изготавливаемых из ПКМ, целесообразно провести серию полных факторных экспериментов (ПФЭ) типа 2^n ²⁴, где n - число факторов, 2^n – общее число опытов в эксперименте. Для чего достаточно получить модель в виде уравнения регрессионного анализа, которое позволит определить силу и характер влияния факторов, и их взаимодействие на отклик [103-107]. Методика планирования эксперимента при исследовании систем с качественными факторами предложена Фишером [108] и использует в качестве основы модели и методы дисперсионного анализа.

Зададим область эксперимента. В условиях проводимого исследования предел прочности полученных ПКМ полностью отвечает всем требованиям, накладываемым на зависимую переменную. В дальнейшем будем называть его – отклик. Выбираем четыре независимых качественных фактора, непосредственно влияющих на отклик. Обозначим:

x_1 - ориентация слоев стеклоткани

«+» при ориентации слоев в трех направлениях $0^\circ; 45^\circ; -45^\circ$;

«-» при однонаправленной ориентации;

x_2 - наличие в матрице нанодисперсных модификаторов в виде ультрадисперсных порошков

«+» при наличии нанодобавки;

²⁴ эксперимент, включающий факторы, каждый из которых устанавливается только на двух уровнях: верхнем (+1) и нижнем (-1).

«-» при ее отсутствии;

x_3 - вид нанодисперсного модификатора

«+» ультрадисперсный порошок корунда Al_2O_3 ;

«-» ультрадисперсный порошок бемита $Al(OOH)$;

x_4 - степень присутствия нанодисперсного модификатора в ПКМ (наличие покрытия)

«+» - покрытие есть (наполнители добавлены только в покрытие композита);

«-» - покрытия нет (сквозная пропитка стеклоткани С+ наполнитель).

Расчеты выполнены при помощи Microsoft Excel по программе «Дисперсионный и регрессионный анализ МФЭ» v.6 кафедры МЗ-КФ «Технология машиностроения» КФ ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана. При реализации дополнительного эксперимента проводилось равномерное трехкратное дублирование опытов.

Последовательность выполнения статистической обработки и проверки пригодности для практики построенной модели

Обработка полученных экспериментальных данных велась на основании стандартной методики [103-108] по следующему алгоритму.

1. Для каждой строки матрицы планирования по результатам параллельных опытов находится среднее выборочное значение отклика и его дисперсия:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2}{f}, \quad (3.2)$$

где n - объем выборки;

$f = n - 1$ - число статистических степеней свободы.

2. Выполняется проверка гипотезы однородности дисперсии опытов. При равномерном дублировании опытов однородность ряда дисперсии проверяют по G - критерию

$$G^{расч} = \frac{S_{i \max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (3.3)$$

где $N = 2^k$ - количество опытов в эксперименте;

k - количество факторов.

Дисперсии однородны, если расчетное значение критерия не превышает его табличного значения. $G_{\alpha, f, N}^{табл}$, где $\alpha = 0,05$ уровень значимости, т.е. с доверительной вероятностью $P = 0,95$ гипотеза об однородности ряда дисперсии не отвергается.

3. Определяется дисперсия воспроизводимости опытов (отклика), которая характеризует погрешность эксперимента в целом.

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N S_i^2. \quad (3.4)$$

4. Рассчитываются значения коэффициентов уравнения регрессии

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i}{N}; \quad b_j = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{x}_j)_i \cdot \bar{y}_i}{N}; \quad b_{jl} = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{x}_j)_i \cdot (\hat{x}_l)_i \cdot \bar{y}_i}{N}; \quad j, l = 1, \dots, k; j \neq l, \quad (3.5)$$

где $(\hat{x}_j)_i, (\hat{x}_l)_i$ - кодированные значения соответственно j -ого и l -го факторов в i -ом опыте (строке) матрицы плана.

5. Выполняется проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии. Для проверки используют доверительный интервал, определенный с помощью t - критерия.

Величина доверительного интервала для коэффициентов уравнения регрессии

$$\Delta b_i = t_{\alpha, f} \cdot \sqrt{\frac{S_y^2}{f}}, \quad (3.6)$$

где $t_{\alpha, f}$ - табличное значение коэффициента Стьюдента,

$f = N \cdot (n - 1)$ - число степеней свободы, с которыми определяется дисперсия воспроизводимости отклика.

Коэффициенты регрессии значимы с доверительной вероятностью 95%, если их абсолютная величина больше величины доверительного интервала:

$$\Delta b_i \leq |b_i|. \quad (3.7)$$

Статистически незначимые²⁵ коэффициенты уравнения регрессии могут быть отброшены, то есть, исключены из уравнения регрессии.

6. Принимая во внимание только значимые коэффициенты, записывается уравнение регрессии в нормализованном масштабе уровней факторов. Выполняется проверка адекватности этой модели и делается заключение о ее пригодности для практики.

Если хотя бы один из коэффициентов уравнения регрессии не значим, проводят проверку адекватности. Для этого вначале вычисляют дисперсию адекватности

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{(N - L)} \cdot \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2, \quad (3.8)$$

где \bar{y}_i - среднее значение отклика в каждой строке матрицы;

\hat{y}_i - (сигна y) – это значение отклика, вычисленное по уравнению регрессии для каждой строки матрицы;

N - количество опытов в эксперименте;

L - число коэффициентов в уравнении регрессии, оставшихся после отбрасывания малозначимых.

Если дисперсия адекватности меньше дисперсии воспроизводимости, то вывод об адекватности модели можно сделать без проверки по критерию Фишера (F - критерия), так как $F_{\alpha, f_1, f_2}^{табл} > 0$, где $f_1 = N - L$ (число степеней свободы для числителя), $f_2 = N \cdot (n - 1)$ (число степеней свободы знаменателя дисперсии воспроизводимости).

Расчетное значение критерия Фишера определяется из выражения

$$F^{расч} = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} \quad (3.9)$$

²⁵ Незначимость коэффициента свидетельствует либо об отсутствии, либо о незначительном влиянии эффекта соответствующего фактора, либо произведения факторов.

и сравнивается с табличным. Если $F^{расч} \leq F_{\alpha, f_1, f_2}^{табл}$, тогда гипотезу об адекватности построенной модели результатам эксперимента принимают с доверительной вероятностью $P=0,95$ при соответствующем числе степеней свободы. При невыполнении этого условия модель не адекватна, и пользоваться ею нельзя.

3.3. Методика изучения микротвердости поверхностных фаз модифицированных ПКМ

3.3.1. Объект изучения

1. В качестве объекта лабораторного тестирования выбраны образцы ПКМ на основе стеклоткани Т-10 ГОСТ 19170-73 и эпоксидной смолы ЭД-6 по ГОСТ 10587-84 с соответствующими добавками (пластификатор – ДБФ, отвердитель – ПЭПА), обозначение групп соответствует указанным выше (см. п. 3.2.1)

1.1. Образцы без добавок – 1 группа,

1.2. Образцы с добавлением в смолу бемита – 2 группа,

1.3. Образцы с добавлением в смолу корунда – 3 группа.

3.3.2. Цель

Целью являлось определение влияния ультрадисперсных порошков бемита $Al(OOH)$ или корунда Al_2O_3 в покрытии образца на микротвердость поверхности ПКМ.

3.3.3. Общие положения

Для определения микротвердости согласно ГОСТ 9450-76 применяют следующие типы алмазных инденторов: с четырехгранной пирамидой с квадратным основанием (индекс «кв.»), с трехгранной пирамидой с основанием в

виде равностороннего треугольника (индекс «тр»), с четырехгранной пирамидой с ромбическим основанием (индекс «рб»); бицилиндрический наконечник (индекс «ц»). Наиболее широко используется четырехгранная пирамида с квадратным основанием и углом при вершине 136° (т.е. такая же, как и в методе Виккерса (HV) схема выполнения лабораторного тестирования приведена на рисунке 24.

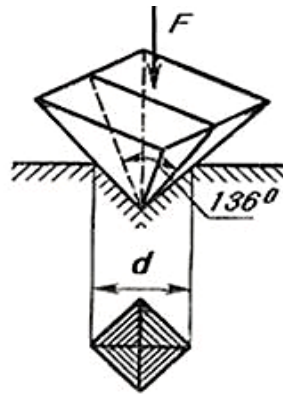


Рисунок 24 – Схема проведения лабораторного тестирования

Микротвердость можно определить двумя методами: восстановленного и не восстановленного отпечатка. Первый метод является основным; твердость определяется делением приложенной нагрузки на условную площадь боковой поверхности, определенную на основе измерения двух диагоналей отпечатка. Вторым методом используется реже; число микротвердости определяют делением приложенной нагрузки на условную площадь боковой поверхности отпечатка, вычисленную на основе измерения глубины отпечатка.

При измерении микротвердости методом восстановленного отпечатка с использованием индентора – четырехгранной алмазной пирамиды с углом α при вершине 136° - формула для расчета твердости:

$$H_{кв} = \frac{F}{S} = \frac{2F \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,854 \frac{F}{d^2}, \quad (3.10)$$

где d - диагональ отпечатка, мм;

α - пространственный угол в вершине;

F - нормальная нагрузка в кГс, приложенная к алмазному индентору.

Число микротвердости записывают так: H с обозначением нагрузки и полученного результата. Например, $H_{10}180$. Это значит, что определение проводилось при нагрузке $F = 10\text{гс}$ и микротвердость составляет $180 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$.

1. Микротвердость составляющих покрытие фаз оценивали методом восстановленного отпечатка на приборе ПМТ-3 в лаборатории материаловедения КФ ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга, РФ (технические характеристики прибора см. приложение В).
2. Для нагружения применялись специальные грузы в форме шайб с вырезом массой 5, 10, 20, 50, 100, 200 и 500г.
3. Диагональ полученного отпечатка измерялась окулярным микрометром (система измерения прибора).

3.3.4. Объем

1. Измерения проводились выборочно для четырех образцов из каждой группы. Так как замерялась микротвердость (в этом случае не имеет значение степень пропитки образца связующим с наполнителем, важно только есть он или нет, кроме того, никакого влияния не оказывает взаимное расположение слоев стеклоткани).

3.3.5. Условия проведения

1. Нагрузка – 200г.
2. Индентор – четырехгранная алмазная пирамида, основание – квадрат.
3. При проведении лабораторного тестирования записывались диагонали отпечатка по трем точкам, и в соответствии с ГОСТ 9450-60, по таблице, рассчитанной на указанную нагрузку, находилось значение микротвердости данного образца.

3.3.6. Результаты

Из-за белого цвета образцов с корундом отпечаток на них в партии 3/1 и 3/3 не был виден. Измерения провести не удалось. Для уточнения результатов тестирования проведена серия дополнительных замеров на образцах каждой группы.

Последовательность статистической обработки соответствует указанной выше (см. п.3.2.6).

3.4. Методика изучения влияния формы наконечника на вырыв крепежного элемента

Первая серия экспериментов лабораторного тестирования имитировала вырыв КЭ из тела композита под прямым углом к соединяемым поверхностям

3.4.1. Объект изучения

1. Лабораторное тестирование проведено на специальных образцах с одним КЭ, представляющие собой пластины ПКМ на основе стеклоткани марки Т-10 ГОСТ 19170-73 и эпоксидной смолы ЭД-6 ГОСТ 10587-84 с отвердителем ПЭПА и пластификатором ДБФ, соединенные с металлическими стержнями посредством заформованных в композит КЭ, имитирующие натурное соединение «сталь-ПКМ» (рисунок 25).
2. Изготовление опытных образцов из КМ выполнялось способом ручной выкладки. Образцы выпиливались из заготовки слоистой пластины, которая изготавливалась следующим образом [109]:
 - на гладкую деревянную цулагу крепилась полиэтиленовая пленка для предотвращения склеивания пластины с поверхностью цулаги;
 - выкладывались 30 слоев стеклоткани, согласно рисунку 26; все слои пропитывались связующим и прикатывались прикаточным роликом, в торец

выложенного таким образом пакета препрега внедрялся металлический стержень, наконечник которого имитировал форму крепежного элемента;

– после выкладки пакета, на поверхность укладывалась фильтровальная ткань, пленка ППН-Т и плита с грузом, предназначенная для создания необходимого давления и выдерживалась до отверждения смолы.

В таком положении осуществлялась совместная полимеризация композита с внедренным металлическим элементом, которая длилась 48 часов. После чего полученные образцы подвергались механической обработке – фрезерованию по торцам. Испытания образцов проводились не ранее чем через 16 часов после отверждения. Наконечники КЭ выполнялись трех видов:

2.1. Игольчатый КЭ;

2.2. КЭ треугольная пластина

2.3. Цилиндрический штифт с законцовкой в виде копьсообразной (лопатообразной) пластины.

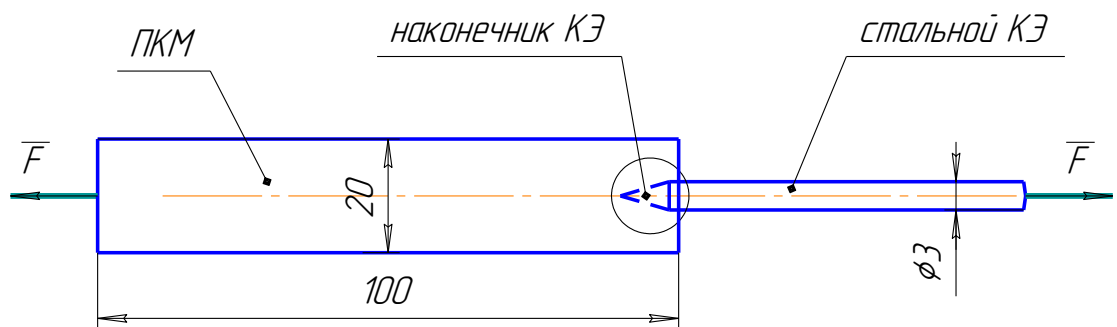


Рисунок 25 – Схема комбинированного соединения «сталь-ПКМ»

3. Для обеспечения крепления образцов в клиновых захватах машины стержни КЭ приваривались к металлической пластине.
4. Общее количество образцов – 30шт. Количество соединений, выполненных по пункту 2.1. – 10 шт., по пункту 2.2. – 10 шт., по пункту 2.3. – 10 шт.

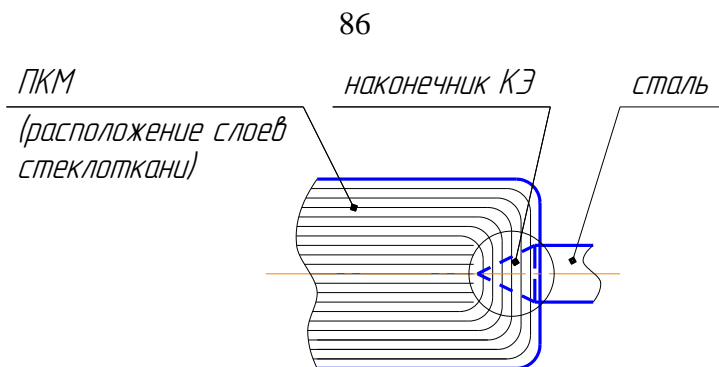


Рисунок 26 – Схема изготовления комбинированного соединения «сталь-ПКМ»

3.4.2. Цель

Целью являлось определение сравнительных характеристик данных соединений для выявления рациональной формы наконечника КЭ.

3.4.3. Общие положения

1. Нагружение образцов при проведении тестирования осуществлялось вдоль оси образцов растягивающей нагрузкой.
2. Исследование проводилось на электромеханической испытательной машине серии LFM 20 - 100 кН – LFM – 100 (ISO 7500-1, класс 0,5) в центральной заводской лаборатории ОАО «КТЗ», г. Калуга, РФ.
3. Измерение усилия проводилось фирменным датчиком силы (при нагрузке меньше 1кН погрешность измерений соответствует 1%, выше 1 кН – 0,5%).
4. Время нагружения образца соответствовало фиксированной скорости перемещения захватов машины $V=5\text{мм/мин}$.
5. За факт разрушения принималось видимое нарушение целостности образца (вырыв КЭ из тела ПКМ).
6. Прием сигналов, их обработка, запись и вывод текущей информации на монитор компьютера в режиме реального времени выполнялось программой DION.stat, поставляемой производителем испытательной машины, Швейцария.

3.4.4. Объем

1. Экспериментальное определение несущей способности соединения «сталь-ПКМ» образцов с тремя типами КЭ.
2. Сравнительная оценка прочности соединений с указанными видами КЭ.

3.4.5. Условия проведения

1. Закрепление образцов проводилось в плоских клиновых захватах, с насечкой зажимных губок, практически исключающей проскальзывание и раздавливание закрепляемых концов образца, а также обеспечивающих осесимметричное приложение растягивающей нагрузки к образцу.
2. Эксперимент проводился при фиксированной скорости перемещения захватов машины $V=5\text{мм/мин}$ (задавалось и поддерживалось системой управления машины LFM – 100).
3. На каждом образце в процессе исследований производился непрерывный визуальный контроль состояния (целостности).

3.4.6. Результаты

В ходе тестирования определялись сравнительные характеристики данных соединений для выявления рациональной формы наконечника КЭ. Основным параметром, лимитирующим возможность использования таких соединений, является толщина стенки детали из композита в зоне соединения, т.е. глубина возможного внедрения КЭ в тело ПКМ. В связи с этим, для сравнительной оценки рассматриваемых КЭ введен эмпирический коэффициент j_σ [109],

$$j_\sigma = \frac{F_\sigma}{H} \quad (3.11)$$

где F_σ – усилие вырыва КЭ из тела ПКМ, Н;

H – глубина внедрения КЭ в тело ПКМ, мм.

3.5. Методика изучения геометрии соединения на вырыв крепежного элемента

3.5.1. Объект изучения

1. Исследования проводились на специальных образцах, представляющих собой пластины ПКМ на основе стеклоткани марки Т-10 ГОСТ 19170-73 и эпоксидной смолы ЭД-6 ГОСТ 10587-84 с отвердителем ПЭПА и пластификатором ДБФ, соединенные с металлическими стержнями посредством заформованных в композит КЭ.
2. Изготовление опытных образцов из КМ выполнялось по технологии, описанной ранее (п. 3.4.1). При этом законцовки КЭ, внедряемые в композит, изготавливались в форме копьёобразной (лопатообразной) пластины и отличались шириной лопатки a , [мм] и глубиной внедрения крепежного элемента в ПКМ l_3 , [мм] [110].
3. Для обеспечения крепления образцов в клиновых захватах машины стержни КЭ приваривались к металлической пластине (рисунок 27)
4. Общее количество образцов – 12шт.

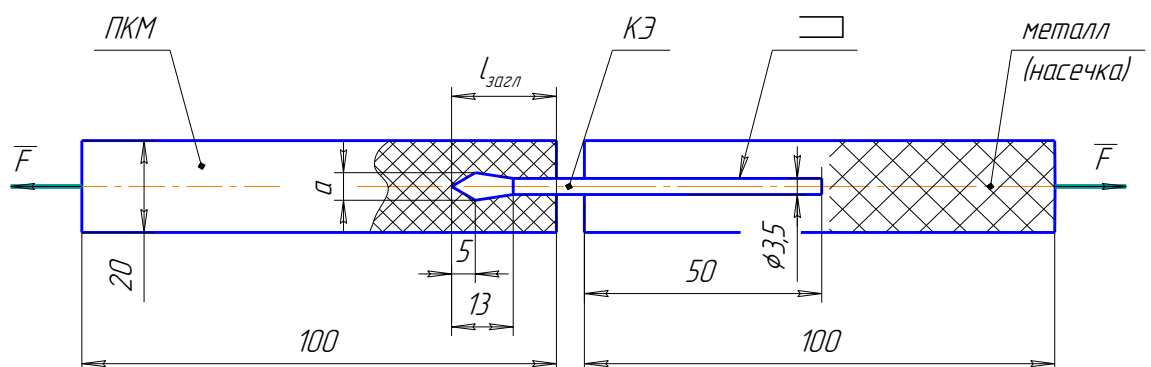


Рисунок 27 – Схема изучения соединения «сталь-ПКМ» КЭ с копьёобразной (лопатообразной) законцовкой на разрыв

3.5.2. Цель

Целью являлось определение влияния геометрии КЭ и глубины внедрения стального элемента в ПКМ на максимальную нормальную (выдергивающую) нагрузку, которую выдерживает изучаемое соединение.

3.5.3. Общие положения

1. Нагружение образцов при проведении тестирования осуществлялось вдоль оси образцов растягивающей нагрузкой.
2. Исследование проводилось на электромеханической испытательной машине серии LFM 20 - 100 кН – LFM – 100 (ISO 7500-1, класс 0,5) в центральной заводской лаборатории ОАО «КТЗ», г. Калуга, РФ.
3. Измерение усилия проводилось фирменным датчиком силы (при нагрузке меньше 1кН погрешность измерений соответствует 1%, выше 1 кН – 0,5%).
4. Время нагружения образца соответствовало фиксированной скорости перемещения захватов машины $V=5\text{мм/мин}$.
5. За факт разрушения принималось видимое нарушение целостности образца (вырыв КЭ из тела ПКМ).
6. Прием сигналов, их обработка, запись и вывод текущей информации на монитор компьютера в режиме реального времени выполнялись программой DION.stat, поставляемой производителем испытательной машины, Швейцария.

3.5.4. Объем

Экспериментальное определение несущей способности соединения «сталь-ПКМ» образцов с копьеобразной (лопатообразной) законцовкой КЭ при различных сочетаниях ширины лопатки (5мм, 8мм) и глубины внедрения КЭ в тело ПКМ (18мм, 25мм) – 4 группы по 3 шт.

3.5.5. Условия проведения

1. Закрепление образцов проводилось в плоских клиновых захватах, с насечкой зажимных губок, практически исключающей проскальзывание и раздавливание закрепляемых концов образца, а также обеспечивающих осесимметричное приложение растягивающей нагрузки к образцу.
2. Эксперимент проводился при фиксированной скорости перемещения захватов машины $V=5\text{мм/мин}$ (задавалось и поддерживалось системой управления машины LFM – 100).
3. На каждом образце в процессе исследований производился непрерывный визуальный контроль состояния (целостности).

3.5.6. Результаты

Для определения влияния геометрии КЭ и глубины внедрения стального элемента в ПКМ на максимальную нормальную (выдерживающую) нагрузку, которую выдерживает изучаемое соединение, был реализован и обработан полнофакторный эксперимент ПФЭ 2^2 [110].

Реализация и обработка ПФЭ проводилась в соответствии с методикой, описанной выше (п. 3.2.6). Так как факторы в данном эксперименте можно выразить количественно, использовался кодированный масштаб уровней факторов, представляющее собой линейное преобразование факторного пространства. При переносе так называемой нулевой точки факторного пространства из натурального масштаба в кодированный, прежде всего, выбирают область проведения эксперимента, задав верхний x_{\max} и нижний x_{\min} пределы изменения фактора в ходе эксперимента. Линейный перенос начала факторного пространства осуществляется для представления уровня факторов в одном масштабе. При кодировании уровней факторов вводят понятие основного или нулевого уровня, который равен половине расстояния между верхним и нижним уровнями на числовой оси. При получении математических моделей в виде

полиномов первой степени кодированный масштаб записывается $+1(+)$ - верхний уровень и $-1(-)$ - нижний уровень. Перевод уровня фактора из натурального масштаба в кодированный производят по формуле:

$$x = \frac{x_{\min}^{\max} - x^0}{\Delta x}, \quad (3.12)$$

где x - уровень фактора в кодированном масштабе;

x_{\min}^{\max} - верхний и нижний уровни фактора в натуральном масштабе;

x^0 - нулевой уровень фактора в натуральном масштабе, $x_0 = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}$;

Δx - интервал варьирования фактора в натуральном масштабе, $\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}$ [103-108].

В условиях проводимого лабораторного тестирования максимальная нагрузка, которую выдерживало изучаемое соединение, полностью отвечала всем требованиям, накладываемым на зависимую переменную (отклик). Исследовались два независимых фактора, непосредственно влияющих на отклик:

x_1 – ширина лопатки внедряемого элемента a , [мм];

x_2 – глубина внедрения стального элемента в композитный материал l_3 , [мм].

Кодирование выбранных факторов (таблица 3).

Таблица 3 – Кодирование факторов

факторы	Уровни факторов, мм			Интервал варьирования
	+1	0	-1	
x_1	8	6,5	5	1,5
x_2	25	21,5	18	3,5

Расчеты выполнены при помощи Microsoft Excel по программе «Дисперсионный и регрессионный анализ МФЭ» v.6 кафедры МЗ-КФ «Технология машиностроения» КФ ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана.

3.6. Методика изучения влияния формы и расположения крепежного элемента в теле композита

Вторая серия экспериментов лабораторного тестирования, в ходе которой определялись сравнительные характеристики соединений для выявления рационального расположения КЭ в теле ПКМ, была направлена на исследование характера разрушения соединения под действием осевой (сдвигающей) силы вдоль соединяемых поверхностей.

3.6.1. Объект изучения

1. Исследования проводятся на образцах прямоугольной формы [109], состоящие из двух пластин (рисунок 28): стальной и ПКМ, соединенных между собой посредством внедряемых КЭ. Образцы выпиливались из слоистой пластины ПКМ выполненной на основе 46 слоев стеклоткани Т-10 ГОСТ 19170-73 и эпоксидной смолы ЭД-6 ГОСТ 10587-84 с отвердителем ПЭПА и пластификатором ДБФ с взаимным расположением однонаправленных слоев в трех направлениях $0^\circ; \pm 45^\circ$; металлические части конструкции – из стали 3 ГОСТ 380-94.

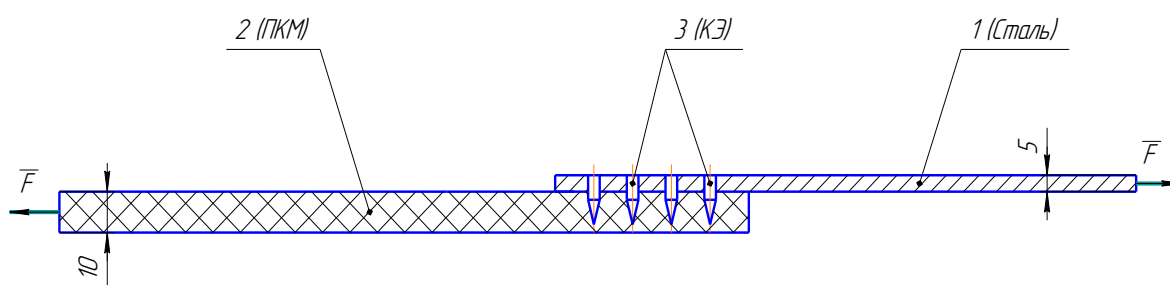


Рисунок 28 – Схема изучения соединения «сталь-ПКМ» на срез

2. Технология изготовления слоистой пластины аналогична изложенной выше. Для предотвращения вырыва КЭ из гнезд металлических пластин цилиндрические части КЭ обрабатывались эпоксидным клеем ЭДП ТУ 07510508.90-94 и крепились резьбовым соединением.

3. Металлическая пластина, посредством закрепленных КЭ, внедрялась в пакет препрега, образованный последовательно выложенными слоями стеклоткани, пропитанными связующим (для обеспечения надежного склеивания, в слой препрега непосредственно контактирующий с металлом дополнительно вводился эпоксидный клей во избежание возникновения «голодного» соединения и как следствие, низкой адгезионной прочности). В таком положении осуществлялась совместная полимеризация композита с внедренными КЭ. Полимеризация пластины длилась 48 часов. После распиливания полученные образцы подвергались механической обработке – фрезерованию по торцам в размер. Тестирование проводилось не ранее чем через 16 часов после отверждения.

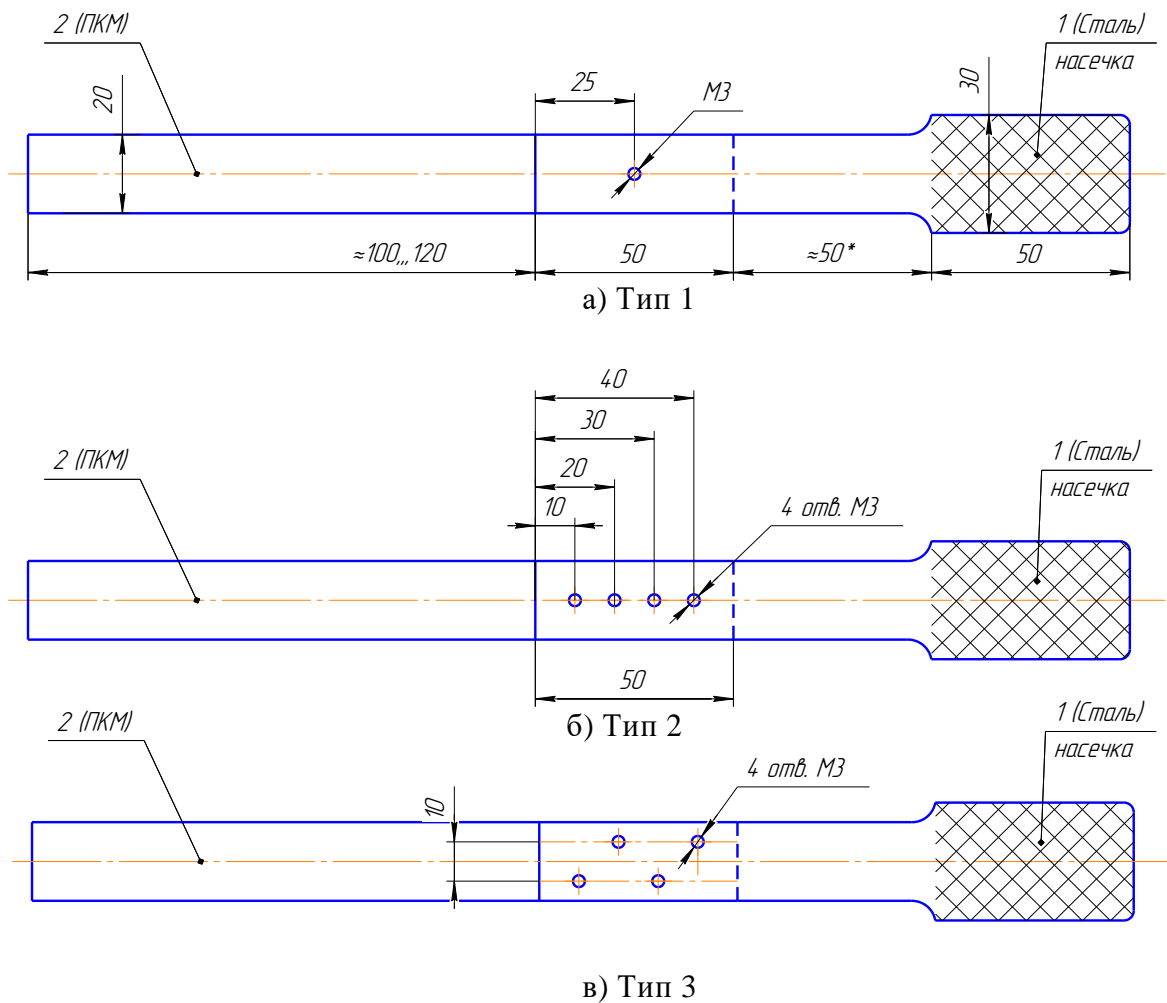


Рисунок 29 – Типы образцов соединения «сталь-ПКМ»

4. Образцы подразделялись на группы по форме используемых КЭ (игольчатый элемент – наиболее распространенный, штифт с копьеобразной (лопатообразной) законцовкой – показавший лучшие характеристики в исследованиях, приведенных выше) и их расположения:
 - 4.1. Тип 1 – с одиночным КЭ (рисунок 29, а);
 - 4.2. Тип 2 – с рядным размещением КЭ (рисунок 29, б);
 - 4.3. Тип 3 – с размещением КЭ в шахматном порядке (рисунок 29в).
5. При этом учитывалось, что взаимное влияние КЭ при заформовке в ПКМ исключается при расстояниях между ними больших, чем $2,5d$, где d - диаметр цилиндрической части КЭ [65].
6. Общее количество образцов – 30шт. Количество соединений, выполненных по пункту 4.1. – 10 шт., по пункту 4.2. – 10 шт., по пункту 4.3. – 10 шт. (по 5 шт. с игольчатым КЭ и КЭ копьеобразной формы в каждой группе соответственно).

3.6.2. Цель

1. Эмпирическое определение несущей способности соединения «сталь-ПКМ» образцов с двумя типами КЭ.
2. Определение сравнительных характеристик данных соединений для выявления рациональной формы наконечника КЭ.
3. Определение вида разрушения в зависимости от типа КЭ.

3.6.3. Общие положения

1. Нагружение образцов при проведении тестирования осуществлялось вдоль оси образцов растягивающей нагрузкой.
2. Исследование проводилось на электромеханической испытательной машине серии LFM 20 - 100 кН – LFM – 100 (ISO 7500-1, класс 0,5) в центральной заводской лаборатории ОАО «КТЗ», г. Калуга, РФ.

3. Измерение усилия проводилось фирменным датчиком силы (при нагрузке меньше 1кН погрешность измерений соответствует 1%, выше 1 кН – 0,5%).
4. Время нагружения образца соответствовало фиксированной скорости перемещения захватов машины $V=5\text{мм/мин}$.
5. За факт разрушения принималось видимое нарушение целостности образца (вырыв КЭ из тела ПКМ).
6. Прием сигналов, их обработка, запись и вывод текущей информации на монитор компьютера в режиме реального времени выполнялось программой DION.stat, поставляемой производителем испытательной машины, Швейцария.

3.6.4. Объем

1. Экспериментальное определение несущей способности соединения «сталь-ПКМ» образцов с двумя видами КЭ под действием сдвигающей силы.
2. Сравнительная оценка прочности соединений с указанными видами КЭ, в зависимости от типа соединения (рисунок 29).

3.6.5. Условия проведения

1. Закрепление образцов проводилось в плоских клиновых захватах, с насечкой зажимных губок, практически исключая проскальзывание и раздавливание закрепляемых концов образца, а также обеспечивающих осесимметричное приложение растягивающей нагрузки к образцу.
2. Тестирование проводился при фиксированной скорости перемещения захватов машины $V=5\text{мм/мин}$ (задавалось и поддерживалось системой управления машины LFM – 100).
3. На каждом образце в процессе исследований производился непрерывный визуальный контроль состояния (целостности).

3.6.6. Результаты

В ходе лабораторного тестирования определялись сравнительные характеристики данных соединений для выявления оптимального расположения КЭ в ПКМ. Основным параметром, определяющим возможность использования таких соединений, является толщина стенки детали из композита в зоне соединения, т.е. глубина возможного внедрения крепежного элемента в тело ПКМ. В связи с этим, для сравнительной оценки рассматриваемых крепежных элементов был введен эмпирический коэффициент j_τ [109],

$$j_\tau = \frac{F}{H} \quad (3.13)$$

где F – усилие среза КЭ, Н;

H – глубина внедрения КЭ в тело ПКМ, мм.

3.7. Методика изучения влияния расположения плоскости лопатки крепежного элемента по отношению к сдвигающей нагрузке

3.7.1. Объект изучения

1. В качестве объекта, основываясь на экспериментальных данных полученных ранее, выбраны образцы прямоугольной формы, состоящие из трех пластин: одной стальной (1) и двух из ПКМ (2) с рядным размещением КЭ с лопатообразной законцовкой (3) [111].
2. Пластины из ПКМ выполнялись по технологии, изложенной выше (п.3.6.1).
3. Разделение образцов на группы (рисунок 30) проводилось в зависимости от ориентации плоскости лопатки КЭ в теле ПКМ по отношению к прикладываемой нагрузке:
 - 3.1. 1 группа – под углом 90° (рисунок 30, а);
 - 3.2. 2 группа – под углом 0° (рисунок 30, б);
 - 3.3. 3 группа – под углами $\pm 45^\circ$ (поочередно) (рисунок 30, в);

3.4. 4 группа – под углом 45°, параллельно друг другу (рисунок 30, г).

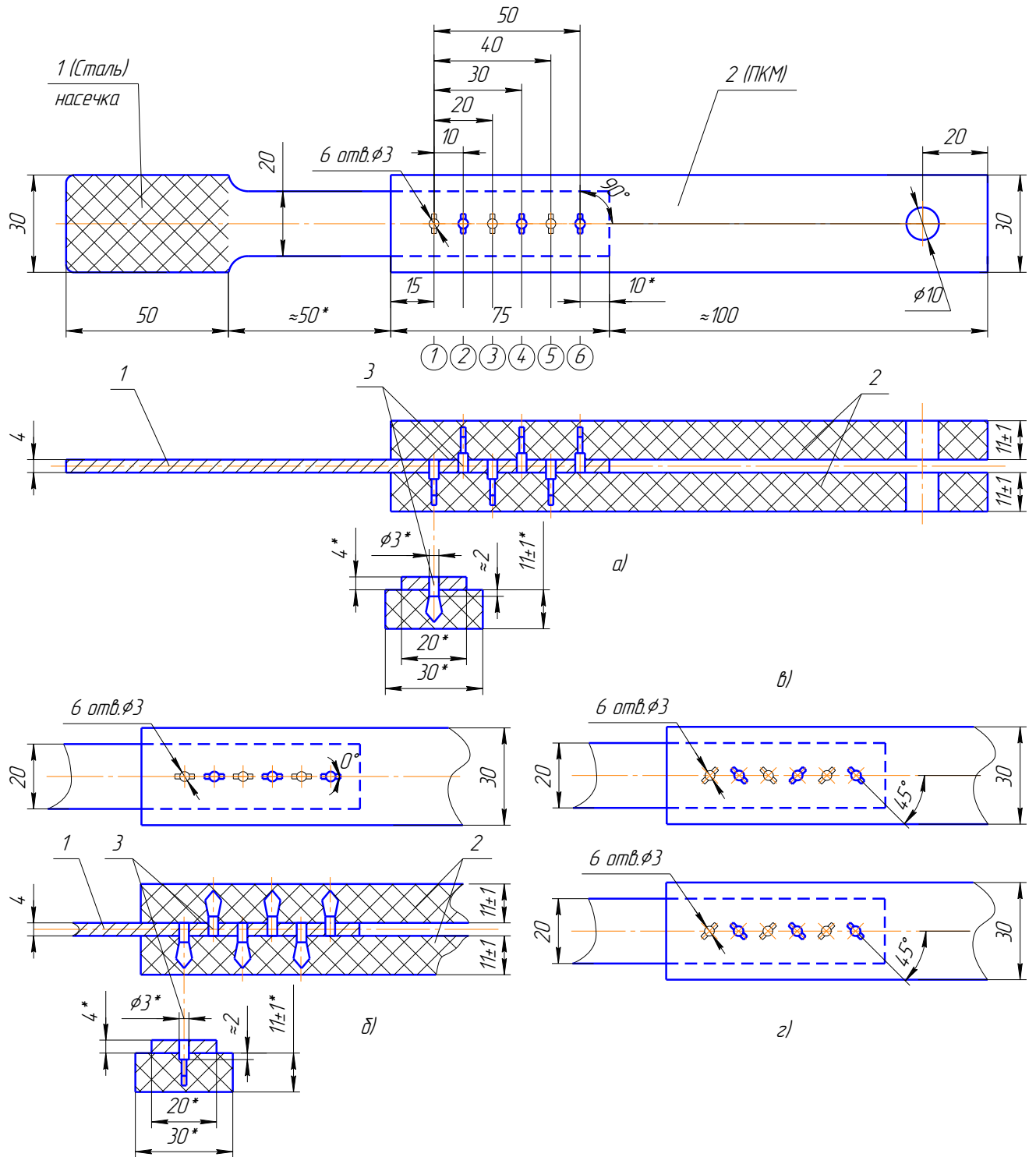


Рисунок 30 – Группы образцов соединения «сталь-композит» (расположение плоскости лопаток КЭ к прикладываемой нагрузке)

а) 1 группа – под углом 90°; б) 2 группа – под углом 0°; в) 3 группа – под углами ±45° (поочередно); г) 4 группа – под углом 45°, параллельно друг другу.

4. Цилиндрические части КЭ обрабатывали эпоксидным клеем ЭДП ТУ 07510508.90-94 и закреплялись с натягом в отверстия металлических пластин. При этом учитывалось, что взаимное влияние КЭ при заформовке в ПКМ исключается при расстояниях между ними больших, чем $2,5d$, где d - диаметр цилиндрической части КЭ [65].
5. Общее количество образцов – 120шт. Количество соединений, выполненных по пункту 3.1. – 30 шт., по пункту 3.2. – 30 шт., по пункту 3.3. – 30 шт., по пункту 3.4. – 30 шт.

3.7.2. Цель

1. Экспериментальное определение несущей способности соединения «сталь-ПКМ» образцов в зависимости от расположения плоскости КЭ по отношению к сдвигающей нагрузке.
2. Определение сравнительных характеристик данных соединений для выявления рационального расположения КЭ в теле ПКМ.
3. Определение вида разрушения в зависимости расположения КЭ в теле ПКМ.

3.7.3. Общие положения

1. Нагружение образцов при проведении эксперимента осуществлялось вдоль оси образцов растягивающей нагрузкой.
2. Исследования проводились на электромеханической испытательной машине серии LFM 20 - 100 кН – LFM – 100 (ISO 7500-1, класс 0,5) в центральной заводской лаборатории ОАО «КТЗ», г. Калуга, РФ.
3. Измерение усилия проводилось фирменным датчиком силы (при нагрузке меньше 1кН погрешность измерений соответствует 1%, выше 1 кН – 0,5%).
4. Время нагружения образца соответствовало фиксированной скорости перемещения захватов машины $V=5\text{мм/мин}$.

5. За факт разрушения принималось видимое нарушение целостности образца (вырыв КЭ из тела ПКМ).
6. Прием сигналов, их обработка, запись и вывод текущей информации на монитор компьютера в режиме реального времени выполнялось программой DION.stat, поставляемой производителем испытательной машины, Швейцария.

3.7.4. Объем

Экспериментальное определение несущей способности соединения «сталь-ПКМ» образцов с рядным размещением КЭ с копьеобразной (лопатообразной) законцовкой в зависимости от взаимного расположения плоскостей лопаток по отношению к сдвигающей нагрузке.

3.7.5. Условия проведения

1. На стальных пластинах выполнялась насечка, что обеспечило отсутствие проскальзывания образцов в клиновых захватах машины, а пластины из ПКМ крепились при помощи специального приспособления с самоцентрирующимся цилиндрическим элементом, обеспечившим соосность при проведении эксперимента (рисунок 31).
2. Эксперимент проводился при фиксированной скорости перемещения захватов машины $V=5\text{мм/мин}$ (задавалось и поддерживалось системой управления машины LFM – 100).
3. На каждом образце в процессе исследований производился непрерывный визуальный контроль состояния (целостности).

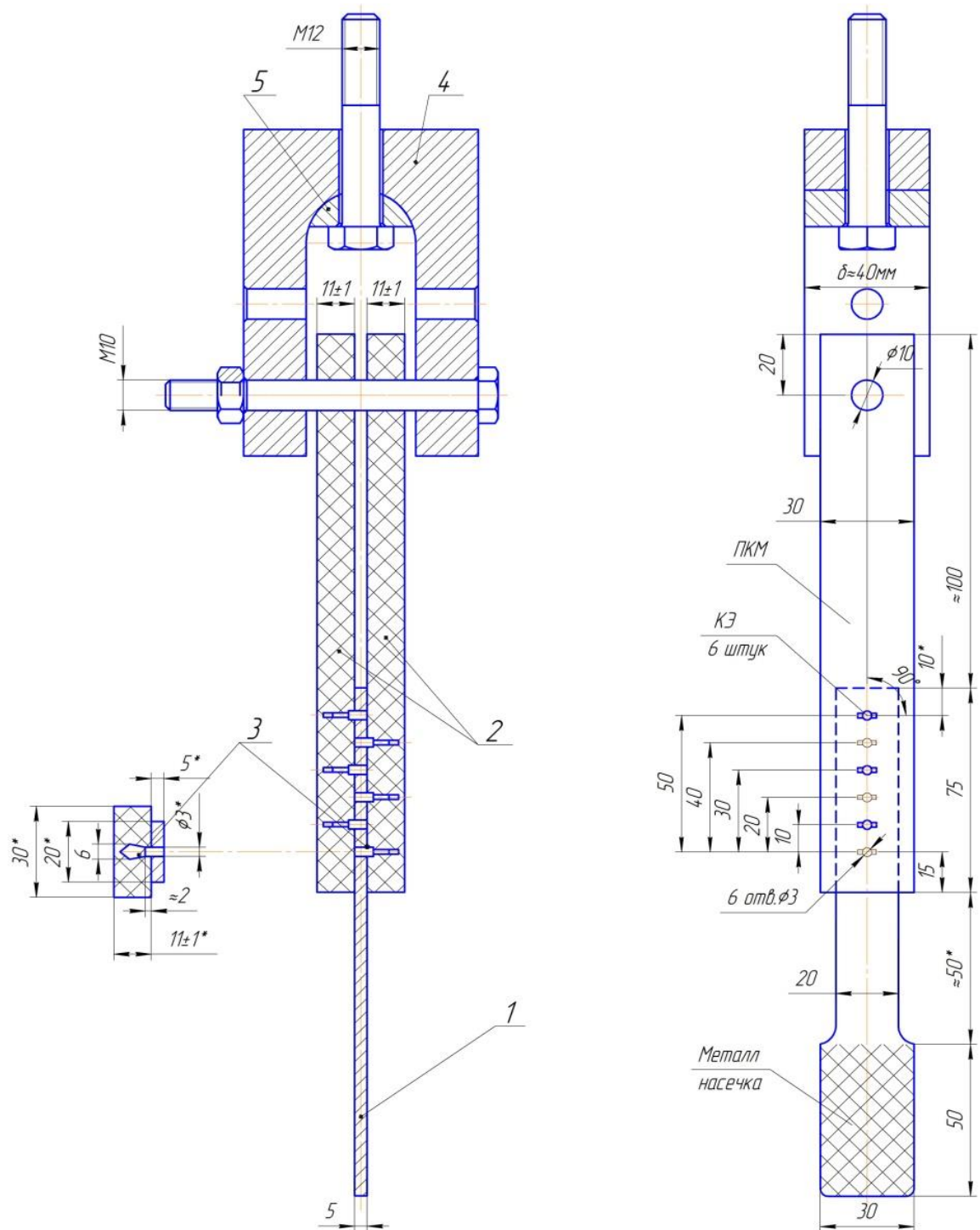


Рисунок 31 – Приспособление и образец для изучения срезающей силы в соединении «сталь-композит»

1 – стальная пластина, 2 – пластины из ПКМ, 3 – КЭ, 4 – корпус приспособления, 5 – центрирующий элемент

3.7.6. Результаты

В процессе проведения лабораторного тестирования осуществлялось монотонное нагружение без выдержек напряжений на заданном уровне, при таком характере нагружения образца усталость материала не проявляется.

Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) образца показывает, что наибольшие усилия воспринимают КЭ, находящиеся ближе к свободному концу стального листа (6 и 5 – отсчет КЭ слева, см. рисунок 30). Из-за большей податливости ПКМ по сравнению с металлом, в месте крепления «сталь-композит» происходит перераспределение нагрузки и часть усилия, передается с ПКМ на стальную пластину образца. Так как крепежных элементов шесть по всему образцу, то усилие на последнем КЭ полностью передается на стальную пластину. Таким образом, предположительно, разрушение образца будет начинаться в месте крепления «сталь-композит» на последнем КЭ, и лишь затем, вследствие перераспределения нагрузки, будут разрушаться последующие КЭ.

Последовательность обработки соответствует указанной выше (см. п.3.2.6).

4. Результаты и их анализ

4.1. Изучение модифицированных ПКМ

4.1.1. Изучение прочностных свойств модифицированных ПКМ

При проведении эксперимента записывались диаграммы деформирования образцов ПКМ, вид диаграммы приведен на рисунке 32.

Результаты представлены в приложении Б (таблица Б.2)

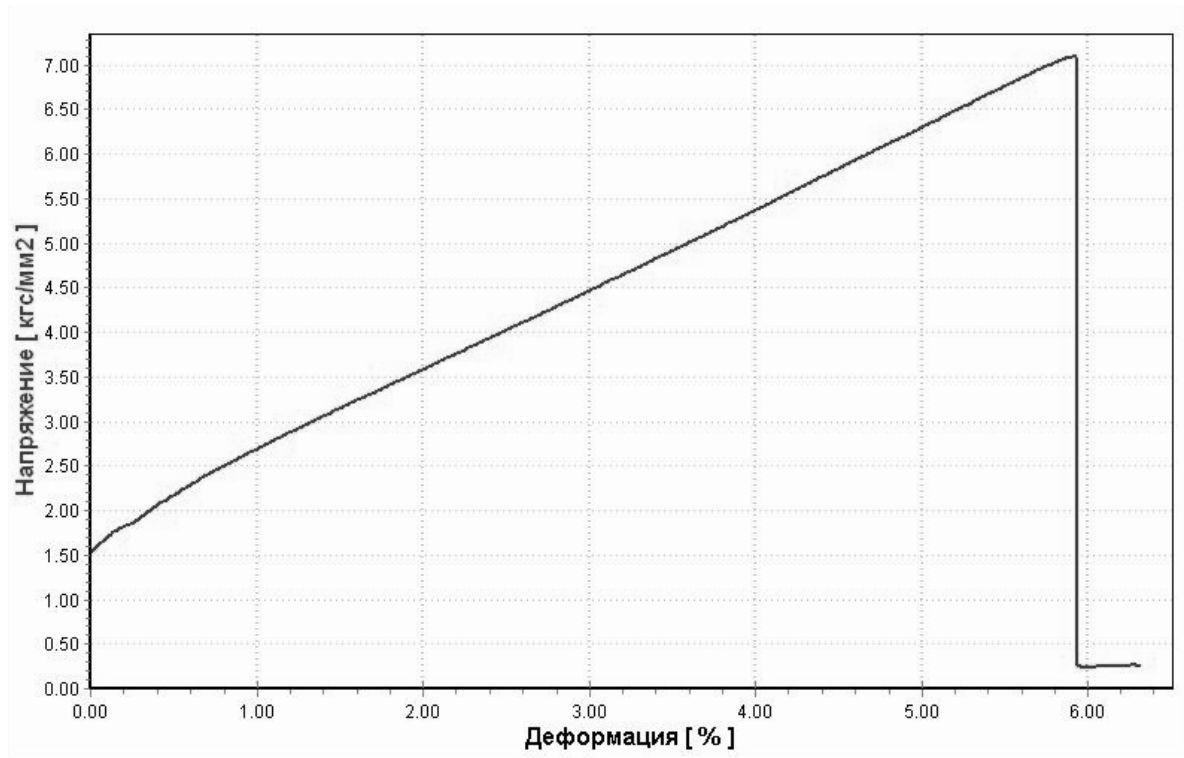


Рисунок 32 – Диаграмма деформирования модифицированного ПКМ²⁶

В процессе обработки эмпирических данных, результаты для всех подгрупп образцов занесены в таблицы и аппроксимированы линейной зависимостью при помощи Microsoft Excel (рисунок Б.3а-3в, приложение Б), в результате чего определен модуль упругости для всех подгрупп образцов.

²⁶ 1МПа≈10кгс/мм²

I. Статистическая обработка экспериментальных данных

Исключение грубых погрешностей из результатов наблюдений

Одним из условий правомерности статистической обработки является требование однородности выборки, для чего необходимо провести цензурирование. Критерии отсеивания промахов зависят от объема выборки. Для малых выборок, согласно ГОСТ Р ИСО 5725-2 – 2002, используют критерии Кохрена или Граббса. Опираясь на результаты исследования Козыря Е.В. [112] в работе выбран критерий Граббса (Grubb's test); как дополнительный – критерий Романовского и выполнена проверка доверительными интервалами по t -критерию (критерий Стьюдента (Student's test) [102-103,114].

Исключение промахов проводилось в следующей последовательности:

- на основании полученных экспериментальных данных (таблица Б2) был записан вариационный ряд;
- производилось предварительное цензурирование выборки, причем не рассматривались крайние, «слишком» удаленные от центра, наблюдения, похожие на промахи;
- рассчитывались выборочные оценки оставшегося вариационного ряда

- среднее выборочное
$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n},$$

где y_i - элемент выборки; n - объем выборки;

- дисперсия
$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2}{f},$$

где $f = n - 1$ - число статистических степеней свободы;

- среднеквадратичное отклонение (СКО) случайной величины

$$S = \sqrt{S^2},$$

- среднеквадратичное отклонение среднего $S_{\bar{y}} = \frac{S}{\sqrt{n}}.$

– проводилась проверка статистической гипотезы об отсутствии промахов с уровнем значимости $\alpha = 0,05$ на основании выбранных критериев (см. таблицу 4).

Таблица 4 – Критерии согласия Граббса и Романовского

Наименование критерия	Критерий Граббса	Критерий Романовского
Расчетная формула	$\tau_{\alpha,n} = \frac{ \bar{y} - y_{\min}^{\max} }{S}$	$\tau'_{\alpha,n} = \frac{ \bar{y} - y_{\min}^{\max} }{\sqrt{\frac{n-1}{n}}S}$
Табличное значение	$\tau_{0,05;5} = 1,87$	$\tau'_{0,05;5} = 1,86$

где y_{\min}^{\max} - крайние, «слишком» удаленные от центра, наблюдения, похожие на промахи.

Результаты цензурирования представлены в приложении Б (таблица Б.3). При удовлетворительных результатах проводилась дополнительная проверка при помощи доверительного интервала по t -критерию:

$$\Delta_{\alpha,n} = t_{\alpha,n} S_y^-$$

где $t_{\alpha,n} = t_{0,05;5} = 2,78$ - значение коэффициента Стьюдента [102].

На основании этой проверки все результаты измеряемой величины, больше $\bar{y} + \Delta_{\alpha,n}$ и меньше $\bar{y} - \Delta_{\alpha,n}$ должны быть исключены как промахи, приложение Б (таблица Б.4). Результаты для дальнейшей статистической обработки представлялись в виде вариационного ряда (см. Таблицу 5).

Таблица 5 – Опытные данные

партия	1/1	1/2	2/1	2/2	2/3	2/4	3/1	3/2	3/3	¾
$y_i = \sigma_\varepsilon,$ МПа	61	64	38	49	44	58	44	45	48	60
	64	66	38	49	45	61	45	47	49	63
	72	71	41	49	46	64	46	47	50	63
	74	74	41	51	47	64	46	48	52	66
	76	79	43	51	49	67	46	48	54	68

Определение закона распределения

Для принятия решения о законе распределения использовали вероятностную сетку (бумагу) [102, 112-115] (пример см. приложение Б, рисунок Б.4.). Наилучшие показатели для всех подгрупп образцов обнаружались у распределения Вейбулла. Для модели Вейбулла плотность распределения σ_e описывается выражением:

$$p(\sigma_e) = \frac{a}{c} \cdot \left(\frac{\sigma_e}{c}\right)^{(a-1)} \exp\left(-\left(\frac{\sigma_e}{c}\right)^a\right), \quad (4.1)$$

а функция распределения

$$F = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\sigma_e}{c}\right)^a\right), \quad (4.2)$$

где a - параметр формы распределения;

c - масштабный параметр.

Оба – всегда больше нуля [114]. Математическое ожидание [113]:

$$m[\tilde{\sigma}_e] = c \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{a}\right) \right], \quad (4.3)$$

где $\Gamma\left(1 + \frac{1}{a}\right)$ - табулированная полная Гамма-функция величины $1 + \frac{1}{a}$.

Оценкой математического ожидания $m[\tilde{\sigma}_e]$ является выборочное среднее $\overline{\sigma_e}$ и, проанализировав погрешность в определении выборочного среднего $\delta, \%$, можно проанализировать погрешность проведения эксперимента в целом, т.е. погрешность измерения результатов [112]:

$$\delta = \frac{|m[\tilde{\sigma}_e] - \overline{\sigma_e}|}{m[\tilde{\sigma}_e]} \cdot 100\%. \quad (4.4)$$

Результаты расчета сведены в таблицу 6.

Погрешность измерений при проведении эксперимента составляет от 1,032% до 0,001%, что соответствует высокой степени точности проведения измерений.

Таблица 6 – Результаты расчета

партия	a	c	$\Gamma(1 + \frac{1}{a})$	$m[\tilde{\sigma}_e]$	$\overline{\sigma}_e$	$\delta, \%$
1/1	15,0797	72,0218	0,9658249623	69,56	69,40	0,233
1/2	14,2365	73,355	0,9641537783	70,72	70,83	0,158
2/1	23,293	41,4269	0,9895113810	40,69	40,27	1,032
2/2	54,7702	50,296	0,9897854302	49,78	49,78	0,001
2/3	27,5259	47,0562	0,9802936096	46,12	46,12	0,003
2/4	24,2341	64,2228	0,9775047446	62,79	62,65	0,229
3/1	84,2404	45,7537	0,9932858693	45,44	45,44	0,003
3/2	61,2275	47,4812	0,9908325551	47,04	47,05	0,011
3/3	24,4185	51,6665	0,9779606259	50,52	50,75	0,454
3/4	25,6801	65,3281	0,9789712092	63,95	64,10	0,226

Проверка дисперсий полученных выборок на однородность

Прежде чем сравнивать значения математических ожиданий полученных выборок, необходимо убедиться в однородности дисперсий, в противном случае сравнение полученных значений проводить нельзя. Для проверки гипотезы об однородности (равенстве) нескольких дисперсий при равномерном дублировании опытов применяют G -критерий (критерий Кохрена (Cochran's test)). Указанный критерий наиболее «мощный» из применяемых при условии, что число анализируемых выборок больше двух даже в случае нарушения предположения о нормальности закона распределения случайной величины [116-117].

$$G^{расч} = \frac{S_{i \max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (4.5)$$

где N - количество опытов в эксперименте;

$\sum_{i=1}^N S_i^2$ - сумма ряда проверяемых дисперсий;

$S_{i \max}^2$ - максимальное значение из ряда проверяемых дисперсий.

Дисперсии однородны, если расчетное значение критерия не превышает его табличного значения $G_{\alpha, f, N}^{табл}$, где $\alpha = 0,05$ уровень значимости, т.е. с доверительной вероятностью $P = 0,95$ гипотеза об однородности ряда дисперсии не отвергается. Данные для расчета приведены в приложении Б (таблица Б.3).

$$G_{0,05,4,12}^{табл} = 0,2624, \quad G^{расч} = \frac{S_{i \max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} = \frac{42,48}{197,69} = 0,2149.$$

Так как расчетное значение статистики не превышает табличного, то по указанным группам можно провести сравнение средних и проанализировать результаты опытов.

Тест на равенство средних

Сравнение двух и более независимых выборок проводят посредством сравнения средних значений (математических ожиданий), в условии данного исследования – с применением однофакторного дисперсионного анализа (One Way ANalysis Of Variance – ANOVA) который позволяет проанализировать средние значения более чем двух выборочных групп [118-119]. Однофакторный дисперсионный анализ проведен для всех 4 групп образцов и, далее, попарно для всех возможных сочетаний. Результаты представлены в приложении Б.

Дисперсионный анализ результатов показал, что в группах 2/4 и 3/4 отсутствуют значимые различия между средними значениями, следовательно, вид вводимого порошка только в покрытие (при наличии повернутых слоев) не оказывает значительного влияния на предел прочности. В остальном группы являются независимыми, и результаты в отклонении изучаемого параметра вызваны именно разницей условий в группах, а не отклонением в результате нестабильности эксперимента.

Обработку полученных экспериментальных данных удобно представить в виде графиков (см. рисунок 33). Условные обозначения: С – связующее

(эпоксидная смола с соответствующими добавками пластификатор ДБФ и отвердитель ПЭПА).

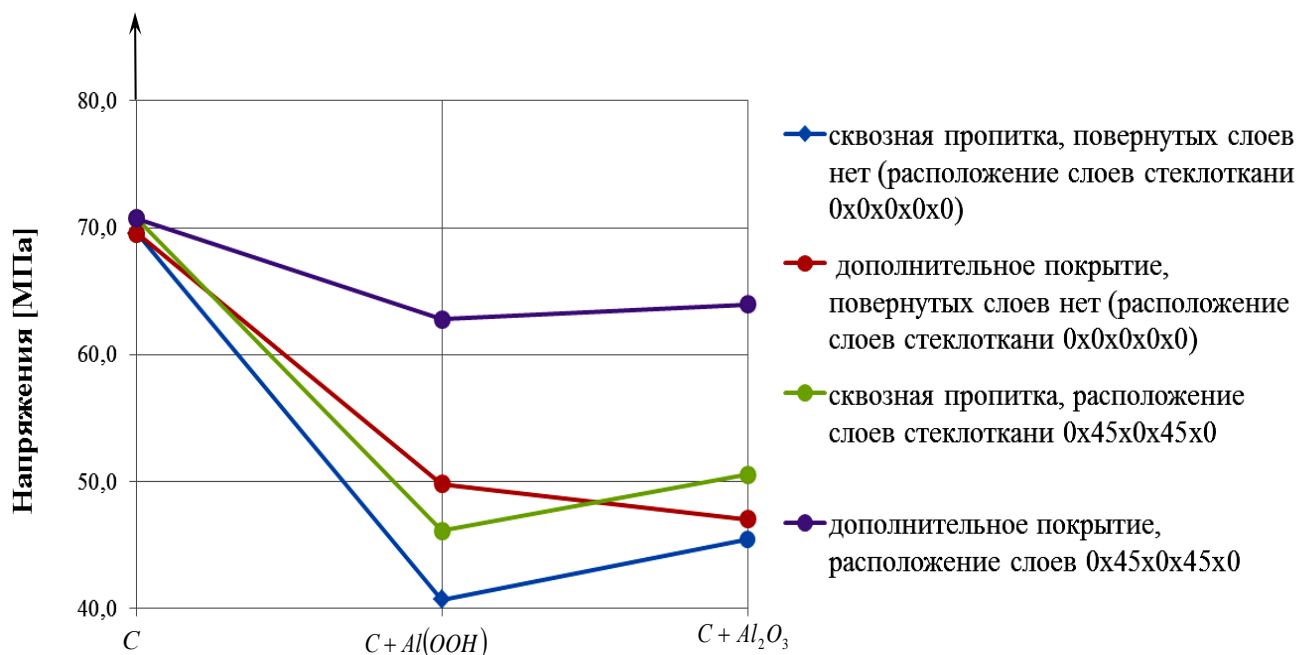


Рисунок 33 – Результаты тестирования по определению предела прочности ПКМ

Анализ результатов показывает, что предел прочности ПКМ при сквозной пропитке образцов связующим с наноразмерными модификаторами в виде ультрадисперсных порошков бемита Al(OOH) и корунда Al₂O₃ падает значительно: на 44% и 34,7% соответственно при однонаправленной ориентации слоев стеклоткани; на 29,6% и 28,6% соответственно при ориентации слоев в трех направлениях 0°;45°;-45°.

Если же добавлять указанные модификаторы только в покрытие композита, то предел прочности падает несколько меньше: на 41,5% и 32,4% соответственно при однонаправленной ориентации слоев стеклоткани; на 11,3% и на 9,6% соответственно при ориентации слоев в трех направлениях 0°;45°;-45°.

При этом, как и предполагалось, при ориентации слоев в трех направлениях 0°;45°;-45° предел прочности значительно выше, чем при однонаправленной ориентации слоев стеклоткани.

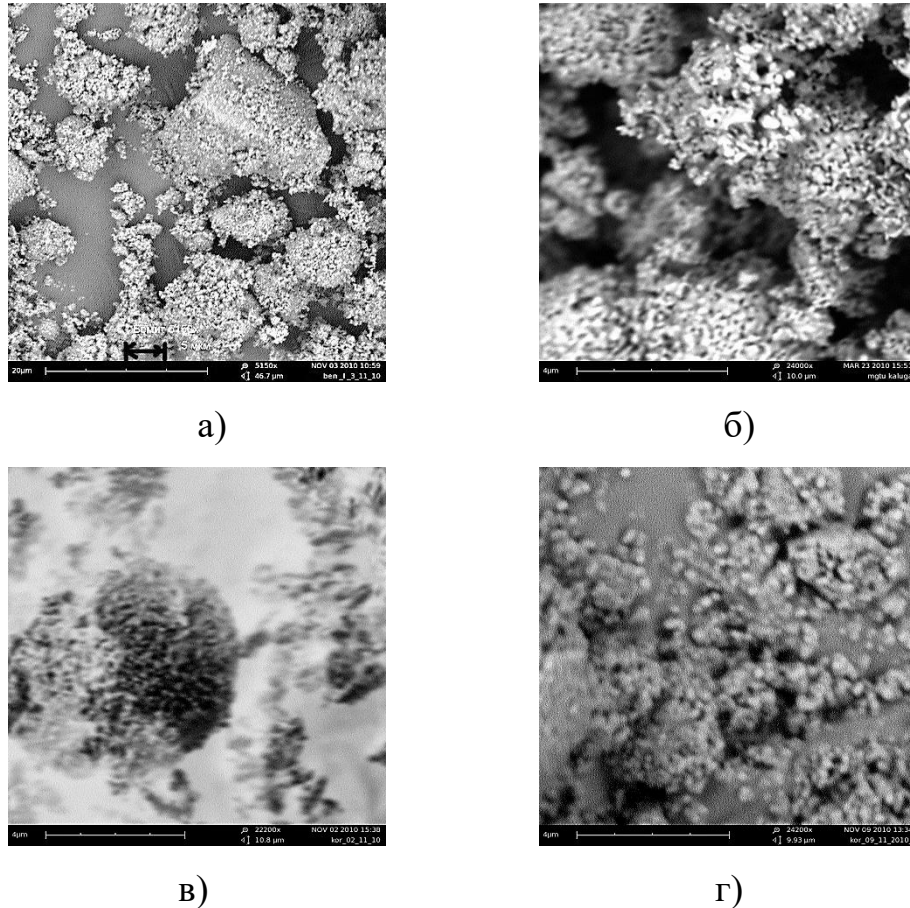


Рисунок 34 – Фотографии порошков наполнителей

а) бемит $\text{Al}(\text{OOH})$, увеличение 5150х, б) бемит $\text{Al}(\text{OOH})$, увеличение 24000х,
 в) корунд Al_2O_3 , увеличение 22200х, г) корунд Al_2O_3 , увеличение 24200х.

Полученные данные можно объяснить следующим образом. С одной стороны частицы наполнителя являются концентраторами напряжений. Одновременно при их введении уменьшается доля поперечного сечения матрицы, держащей нагрузку. Кроме того, отдельные частицы порошков слипаются в зерна (рисунок 34), поэтому для их дальнейшего применения необходимо разработать технологию разделения зерен на отдельные частицы. Именно эти факторы обуславливают уменьшение прочности для композитов, наполненных порошками²⁷. Более подробно эти явления рассмотрены в [120-121].

²⁷ E. Vassileva, K. Friedrich. Epoxy/Alumina Nanoparticle Composites. II. Influence of Silane Coupling Agent Treatment on Mechanical Performance and Wear Resistance. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 101, 4410-4417 (2006)

Для уточнения степени влияния всех указанных факторов на предел прочности представленного ПКМ, проводились дополнительное планирование и реализация полного факторного эксперимента.

II. Реализация и обработка ПФЭ 2^4 по определению влияния технологии изготовления ПКМ на предел прочности

Таблица 7 – План эксперимента и результаты его обработки

№ опыта	\hat{x}_1	\hat{x}_2	\hat{x}_3	\hat{x}_4	Результаты параллельных опытов			\bar{y}	S_i^2	значения коэф-ов уравнения регрессии		%
					$(y_i)_1$	$(y_i)_2$	$(y_i)_3$			b	%	
1	+	+	+	+	63	63	66	64,000	3,000	b0	60,46	-
2	-	+	+	+	47	47	48	47,333	0,333	b1	2,63	5,155
3	+	-	+	+	66	71	74	70,333	16,333	b2	-9,71	70,513
4	-	-	+	+	64	72	74	70,000	28,000	b12	2,46	4,521
5	+	+	-	+	61	64	64	63,000	3,000	b3	0,54	0,220
6	-	+	-	+	38	41	41	40,000	3,000	b13	0,13	0,012
7	+	-	-	+	66	71	74	70,333	16,333	b23	0,54	0,220
8	-	-	-	+	64	72	74	70,000	28,000	b123	0,13	0,012
9	+	+	+	-	49	50	52	50,333	2,333	b4	1,42	1,501
10	-	+	+	-	45	46	46	45,667	0,333	b14	2,42	4,369
11	+	-	+	-	66	71	74	70,333	16,333	b24	1,42	1,501
12	-	-	+	-	64	72	74	70,000	28,000	b34	0,50	0,187
13	+	+	-	-	45	46	47	46,000	1,000	b124	2,42	4,369
14	-	+	-	-	49	49	51	49,667	1,333	b134	-0,92	0,629
15	+	-	-	-	66	71	74	70,333	16,333	b234	0,50	0,187
16	-	-	-	-	64	72	74	70,000	28,000	b1234	-0,92	0,629
$\sum_{i=1}^N S_i^2$									191,667	$\sum \%$		91,93

Примечание:

- коэффициенты уравнения регрессии, отброшенные, как не значимые.

Проверка гипотезы однородности дисперсии опытов:

$$G_{0,05;2;16}^{табл} = 0,335; G^{расч} = \frac{S_{i \max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} = \frac{28}{191,667} = 0,146.$$

Т.к. $G^{расч} < G_{0,05;2;16}^{табл}$, то с доверительной вероятностью 95% и соответствующим числом степеней свободы принимаем гипотезу об однородности дисперсий.

Дисперсия воспроизводимости опытов (отклика)

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N S_i^2 = \frac{191,667}{16} = 11,979.$$

Величина доверительного интервала для коэффициентов уравнения регрессии: число степеней свободы, с которыми определяется дисперсия воспроизводимости отклика $f = N \cdot (n - 1) = 16 \cdot (3 - 1) = 32$; табличное значение коэффициента Стьюдента $t_{0,05;32} = 2,0369$;

$$\Delta b_i = t_{0,05;32} \cdot \sqrt{\frac{S_y^2}{f}} = 2,0369 \cdot \sqrt{\frac{11,979}{32}} = 1,246.$$

Коэффициенты регрессии значимы с доверительной вероятностью 95%, если их абсолютная величина больше величины доверительного интервала:

$$1,246 \leq |b_i|.$$

Для более объективной оценки влияния факторов и их взаимодействия на отклик регрессионный анализ результатов многофакторного эксперимента дополняют дисперсионным анализом, выполняемым по методике [102-105, 108].

Модель является адекватной, если сумма эффектов факторов и их взаимодействий описывает 85% дисперсии отклика. В связи с тем, что суммарный процент дисперсий отклика 91,92%, что больше 85%, следовательно, учтены все факторы и их взаимодействия, существенно влияющие на отклик, необходимости проверять адекватность полученной модели нет.

Обработка многофакторного эксперимента позволила получить следующее уравнение регрессионного анализа с нормализованным масштабом уровней факторов:

$$y(\sigma_s) = 60,46 + 2,63x_1 - 9,71x_2 + 1,42x_4 + 2,46x_1x_2 + 2,42x_1x_4 + 1,42x_2x_4 + 2,42x_1x_2x_4. \quad (4.6)$$

Анализ уравнения регрессии, показывает, что:

- при ориентации волокон стеклоткани в трех направлениях предел прочности увеличивается;
- при введении в связующее наноразмерных модификаторов в виде ультрадисперсных порошков Al_2O_3 и $Al(OOH)$ предел прочности падает, при этом вид добавляемого порошка влияет на предел прочности незначительно;
- при добавлении порошков только в покрытие ПКМ предел прочности увеличивается по сравнению со сквозной пропиткой образца этой смесью;
- также при наличии в связующем наноразмерных модификаторов в виде ультрадисперсных порошков предел прочности можно увеличить за счет ориентации волокон стеклоткани в трех направлениях;
- предел прочности также увеличится при добавлении порошков только в покрытие образца и ориентации волокон в трех направлениях.

Для удобства анализа уравнение регрессии часто представляется в виде столбчатой диаграммы (производится так называемое ранжирование эффектов факторов по t - критерию (критерию Стьюдента) рисунок Б.5, приложение Б).

Дисперсионный анализ (ранжирование эффектов факторов по F - критерию (критерию Фишера) рисунок Б.6, приложение Б) производится, так как он более чувствителен к влиянию того или иного фактора. Дисперсионный анализ на основе многофакторного эксперимента позволяет определить вклад факторов и их взаимодействия в дисперсию отклика.

Дисперсионный анализ результатов ПФЭ 2^4 показывает, что:

- 70,5% вариации дисперсии отклика (предела прочности) вызвано влиянием фактора x_1 (наличия в связующем нанодобавок в виде ультрадисперсных порошков);
- вклад фактора x_2 (ориентации слоев стеклоткани) составляет 5,2%;
- вклад взаимодействия этих факторов составляет 4,5%;

- вклад фактора x_4 (степень присутствия нанодобавки в ПКМ (наличие покрытия) составляет 1,5%;
- вклад взаимодействия факторов x_1x_4 составляет 4,4%;
- вклад взаимодействия факторов x_2x_4 составляет 1,5%;
- вклад взаимодействия факторов $x_1x_2x_4$ составляет 4,4%.

Таким образом, очевидно, что наиболее ощутимое влияние на предел прочности оказывает наличие в связующем модифицирующих добавок в виде ультрадисперсных порошков, причем влияние этого фактора практически в 14 раз сильнее влияния ориентации однонаправленных слоев стеклоткани в ПКМ. Однако, при наличии модифицирующих добавок ориентация слоев стеклоткани и степень присутствия порошка в связующем ПКМ (наличие покрытия) оказывают значительное влияние на предел прочности. Кроме того, дисперсионный анализ показывает, что уравнение регрессии объясняет 91,93% дисперсии отклика. Это означает, что учтены все факторы и их взаимодействия, существенно влияющие на отклик. Результаты регрессионного и дисперсионного анализа качественно совпадают.

Выводы: в ходе эксперимента установлено, что:

- наличие в связующем наноразмерных модификаторов в виде ультрадисперсных порошков Al_2O_3 и $Al(OOH)$ снижает предел прочности композита (на 44% и 35% соответственно);
- негативное влияние на предел прочности можно уменьшить, выбрав структуру с ориентацией слоев стеклоткани минимум по трем направлениям и снизить степень присутствия порошков, оставив их только в покрытии образца (на 11% и 10% соответственно);
- кроме того, эксперимент показал, что вид порошка модификатора оказывает незначительное влияние на предел прочности полученных образцов, а, следовательно, может выбираться по технологическим и экономическим (рыночная стоимость бемита ниже, чем корунда) соображениям.

4.1.2. Изучение микротвердости поверхности модифицированных ПКМ

Результаты измерений сведены в таблицу В.1, приложение В.

Статистическая обработка результатов

В результате измерений микротвердости представленных образцов получены выборки, обработка которых проводилась в программе Minitab 17, с использованием критерия согласия Андерсона-Дарлинга (Anderson-Darling's test). Цензурирование выборок выполнено при помощи контрольных карт согласно ГОСТ Р 50779. 40 -96 (приложение В) [120,123].

Определение закона распределения

Критические значения статистики Андерсона-Дарлинга AD табулированы для объемов выборки $n = 10...40$ ²⁸. После цензурирования получены выборки разного объема. Для всех групп образцов из 15 проверенных законов распределения подходит нормальный закон распределения. Эмпирическая функция распределения на вероятностной сетке представлена в Приложении В, рисунок В.4. Для выбранной модели плотность распределения H_{200} и функция распределения:

$$p(H_{200}) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right), \quad F = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^u \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, \quad (4.7)$$

где обозначено $u = \frac{H_{200} - a}{S}$;

a - параметр формы распределения;

S - СКО.

Для нормального распределения математическое ожидание, согласно [113]:

²⁸ Критерий Андерсона-Дарлинга является одним из самых мощных критериев согласия для выборок небольших объемов, согласно [122](стр. 115-118).

$$m[\tilde{H}_{200}] = a \quad (4.8)$$

Представителем случайной величины является среднее значение ($\overline{H_{200}}$).
Результаты расчета сведены в таблицу 8.

Таблица 8 – Микротвердость поверхностных фаз
в кг/мм²

партия	$\overline{H_{200}}$
1	19,050
2	21,667
3	29,440

Проверка дисперсий полученных выборок на однородность

Для дальнейших исследований было принято предположение о нормальности распределения полученных экспериментальных значений, а для определения равенства среднеквадратических отклонений (СКО) в группах использовался критерий Бартлетта (Bartlett's test), применяемый для проверки гипотезы об однородности нескольких дисперсий, полученных по выборкам разного объема [117].

Статистика критерия Бартлетта B вычисляется в соответствии с соотношением:

$$B = \frac{f \ln \bar{S}^2 - \sum_{i=1}^k f_i \cdot \ln S_i^2}{1 + \frac{1}{3(k-1)} \cdot \left(\sum_{i=1}^k \frac{1}{f_i} - \frac{1}{f} \right)}, \quad (4.9)$$

где $f_i = n_i - 1$ - число степеней свободы для i -ой выборки объема n_i ;

$f = \sum_{i=1}^k f_i$ - общее число степеней свободы;

k - число выборок;

$\bar{S}^2 = \frac{1}{f} \sum_{i=1}^k f_i \cdot S_i^2$ - средняя арифметическая дисперсий, взвешенная по числам степеней свободы;

$S_i^2 = \frac{1}{f_i} \sum_{j=1}^{n_i} (\bar{y}_i - y_{ji})^2$ - оценки выборочных дисперсий i -ой выборки;

y_{ji} - j -ое наблюдение в i -ой выборке;

$\bar{y}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} y_{ji}$ - среднее значение в i -ой выборке.

Если гипотеза верна, и выборки извлекаются из нормальной генеральной совокупности, то статистика приближенно подчиняется χ^2 - распределению. Дисперсии однородны, если расчетное значение критерия не превышает его табличного значения. В условиях проводимого исследования статистика Бартлетта $B = 4,36$; квантиль χ^2 - распределения с $(k-1) = 2$ степенями свободы, при уровне значимости $\alpha = 0,05$: $\chi_{2,0,05}^2 = 5,99$ ²⁹.

Таким образом, с доверительной вероятностью $P = 0,95$ гипотеза об однородности ряда дисперсии не отвергается и их можно усреднять. По указанным группам можно провести сравнение средних и проанализировать результаты опытов.

Определим погрешность проведения эксперимента (данные для расчета см. приложение В, таблица В.2). Дисперсия воспроизводимости опытов, характеризует погрешность эксперимента в целом:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N S_i^2 = \frac{1}{3} \cdot (2,87 + 6,64 + 10,8) = 6,77,$$

где N – число групп.

Определим полосу неопределенности, с помощью t - критерия (критерия Стьюдента)³⁰. Величина полосы неопределенности:

$$\Delta_{\alpha,f} = t_{\alpha,f} \cdot \sqrt{\frac{S_y^2}{f}} = 1,6896 \cdot \sqrt{\frac{6,77}{35}} = 0,75 \text{ кГ/мм}^2,$$

²⁹ Таблица критических точек распределения Пирсона [Электронный ресурс]. URL: http://www.natalymath.ru/krit_pirson.html свободный (дата обращения 31.01.2015)

³⁰ При малом количестве наблюдений и нормальном распределении случайной величины.

где $t_{\alpha, f} = t_{0,95,35} = 1,6896$ – табличное значение коэффициента Стьюдента;

$$f = \sum_{i=1}^N n_i = 14 + 12 + 9 = 35 \quad - \text{число степеней свободы, с которыми определяется}$$

дисперсия воспроизводимости отклика.

Таким образом, абсолютная погрешность проведения эксперимента (измерения случайной величины H_{200}): $\omega = 2\Delta_{0,95,35} = 2 \cdot 0,75 = 1,5 \text{ кГ/мм}^2$.

Относительная погрешность проведения эксперимента (измерения случайной величины H_{200}) $\varepsilon = \frac{\Delta_{\alpha, f}}{y_i} \cdot 100\%$ колеблется от 2,5% до 4%, что считают нормой в технических измерениях.

Тест на равенство средних

Однофакторный дисперсионный анализ проведен для всех 3 групп образцов и далее попарно для всех возможных сочетаний (результаты представлены в Приложении В).

Дисперсионный анализ показал, что результаты в отклонении изучаемого параметра вызваны именно разницей условий в группах, а не отклонением в результате нестабильности эксперимента. Обработку полученных экспериментальных данных представим в виде графика, рисунок 35.

Анализ данных показывает, что микротвердость ПКМ при пропитке верхнего слоя образцов связующим с порошками модификаторами в виде ультрадисперсных порошков бемита $Al(OOH)$ и корунда Al_2O_3 увеличивается на 15% и 55% соответственно. Полученные результаты подтверждается более поздними исследованиями, проведенными в ФГБНУ ГОСНИТИ совместно с рядом научно-исследовательских организаций (ИПМ НАН – Беларусь, ВИИТИН – г. Тамбов и др.), в процессе которых была проведена экспериментальная оценка влияния модифицирующих добавок бемита $Al(OOH)$ и корунда Al_2O_3 на структуру и свойства различных материалов. Получены положительные результаты (рисунок 36).

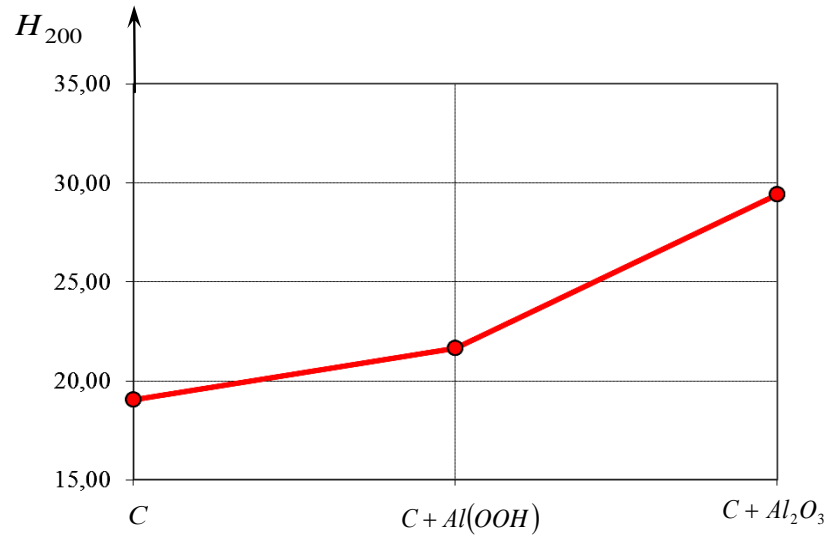


Рисунок 35 – Изменение микротвердости при наличии наноразмерных модификаторов

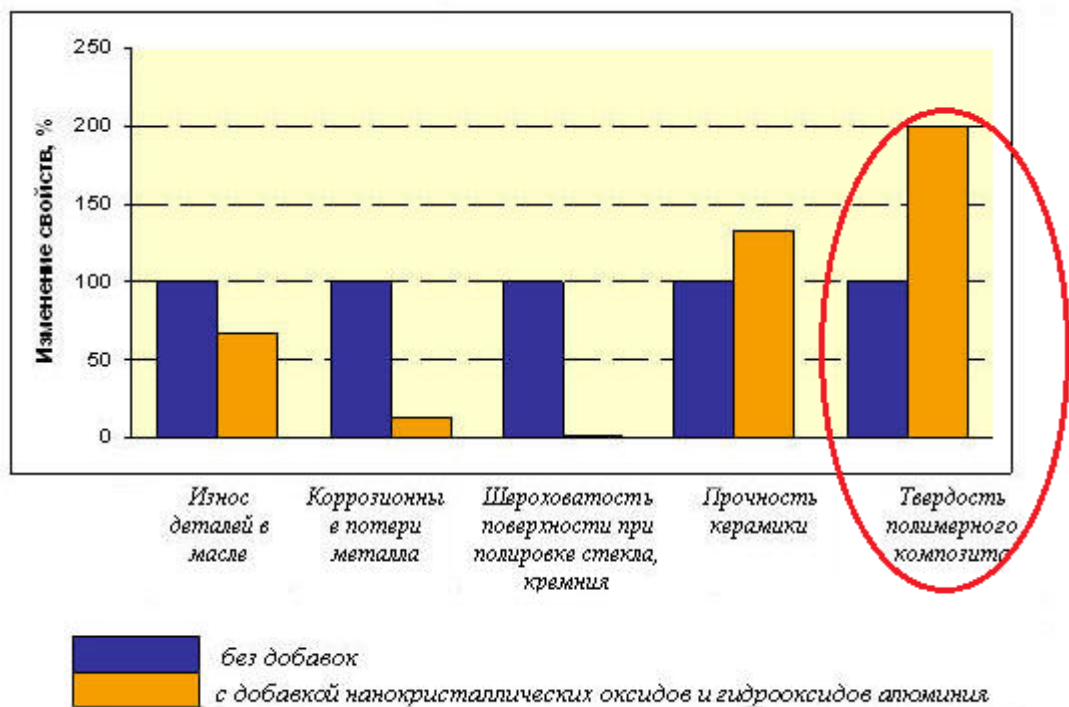


Рисунок 36 – Эффективность применения нанокристаллических порошков алюминия в различных областях³¹

³¹ Источник: [Электронный ресурс]. – Режим доступа http://www.portalnano.ru/read/Infrastructure/russia/nns/gosniti/02_21_05 (10.10.2015), свободный

4.1.3. Результаты изучения модифицированных ПКМ

В рамках диссертационной работы рассмотрена возможность упрочнения поверхности композита с одновременным увеличением износостойкости к действию подвижных абразивных сред введением в матрицу ультрадисперсных порошков бемита $Al(OOH)$ и корунда Al_2O_3 .

Проведены две серии экспериментов для определения прочностных характеристик и микротвердости образцов (рисунок 22, 23), отличающихся не только видом наноразмерных модификаторов, степенью их присутствия в образце, но и взаимной ориентацией однонаправленных слоев композита.

Результаты проведенных экспериментов и анализа доступной литературы позволяют сделать следующие выводы:

- введение ультрадисперсных порошков бемита $Al(OOH)$ и корунда Al_2O_3 в матрицу увеличивают износостойкость поверхности к действию подвижных абразивных сред;
- введение ультрадисперсных порошков бемита $Al(OOH)$ и корунда Al_2O_3 в матрицу значительно снижает предел прочности ПКМ. Однако, если изготавливать ПКМ с ориентацией слоев стеклоткани минимум в трех направлениях и вводить порошки только в покрытие, то снижение предела прочности не столь существенно, примерно 10...11%;
- вид добавляемого порошка не оказывает значимого влияния на предел прочности;
- при введении в покрытие ПКМ ультрадисперсных порошков бемита $Al(OOH)$ и корунда Al_2O_3 микротвердость повышается на 15% и 55% соответственно;
- с использованием специальной технологии измельчения зерен оксидов следует ожидать значительного увеличения прочности и твердости композита.

Полученные механические характеристики ПКМ без наноразмерных модификаторов практически совпадают со справочными данными, а образцы с добавлением ультрадисперсных порошков имеют пониженные механические характеристики. Следовательно, можно рекомендовать использование покрытия с введением выбранных порошков оксидов только в тех тонкостенных конструкциях сельскохозяйственной техники, и только тех их частей, которые подвергаются действию подвижных абразивных сред (силосопроводов, бункерных систем и пр.), а снижение предела прочности учитывать увеличением коэффициента запаса при проектировочных расчетах.

4.2. Изучение влияния формы крепежных элементов на прочность соединения «сталь-композит» под действием нормальной силы

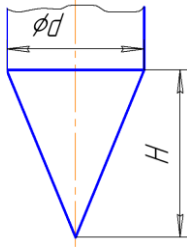
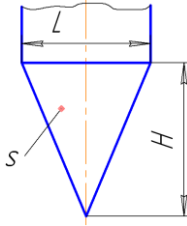
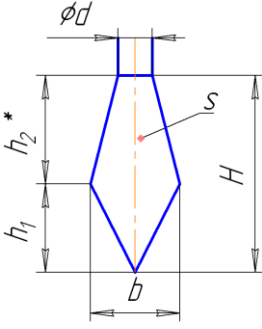
Первая серия экспериментов, в ходе которой определялись сравнительные характеристики соединений для выявления лучшей формы КЭ, была направлена на исследование характера разрушения соединения под действием нормальной (выдерживающей) силы, при которой происходит вырыв КЭ из тела ПКМ. Эти исследования очень важны, как отмечалось выше, так как в литературе до настоящего времени отсутствует экспериментально подтвержденные методики определения именно этой составляющей усилия.

4.2.1. Изучение влияния формы наконечника на вырыв крепежного элемента

В рамках проведенного исследования [109] изучалось влияние геометрии/формы внедряемого КЭ на способность соединения выдерживать нормальные нагрузки. В ходе эксперимента определялись сравнительные характеристики данных соединений для выявления рациональной формы наконечника КЭ (рисунок 25).

Результаты тестирования для удобства анализа сведены в таблицу 9, а в качестве оценки прочностных свойств указанного соединения введен эмпирический коэффициент j_σ , определяемый из выражения 3.11.

Таблица 9 – Результаты тестирования соединений «сталь-ПКМ» на вырыв крепежного элемента

КТР	Вид наконечника КЭ	$j_\sigma = \frac{F_\epsilon}{H}$
Игольчатый элемент		3,5
Треугольная пластина		5,4
Копьеобразная (лопатообразная) пластина		11,6

Эмпирический коэффициент j_σ имеет наибольшее значение для КЭ с копьеобразной (лопатообразной) законцовкой. Это свидетельствует о том, что при равной глубине заделки именно такая форма крепежного элемента дает наиболее прочное соединение. В связи с этим был проведен эксперимент по уточнению влияния геометрических параметров такого КЭ на прочность изучаемого соединения.

4.2.2. Изучение влияния геометрии соединения на вырыв крепежного элемента

При проведении эксперимента (вид образцов, см. рисунок 27) записывались диаграммы деформирования. Вид диаграммы приведен на рисунке 37.

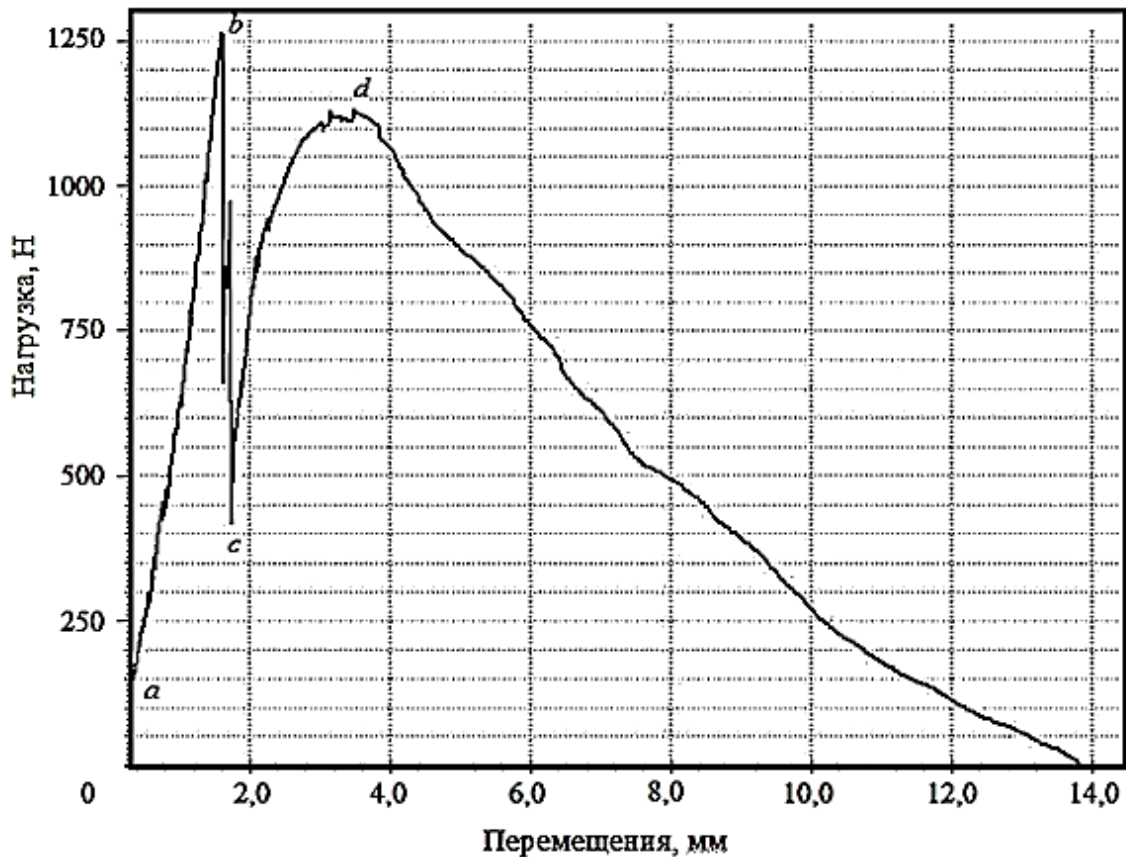


Рисунок 37 – Диаграмма нагружения комбинированного соединения «сталь-ПКМ»

Анализ полученных диаграмм нагружения (рисунок 37) показывает, что разрушение образца происходит ступенчато. В начале нагружения увеличение нагрузки не разрушает образец (участок *ab* диаграммы). При достижении пиковой нагрузки (точка *b*) КЭ сдвигается с места, начинается разрушение соединения (участок *bc* диаграммы). Однако, за счет толщины КЭ и податливости композита происходит смятие ПКМ, образуется усиленный слой, и соединение продолжает

держат нагрузку (участок cd диаграммы). Дальнейшее нагружение приводит к разрушению соединения, КЭ выдергивается из тела ПКМ.

Очевидно, что можно увеличить нормальное (выдергивающее) усилие, усовершенствовав геометрию КЭ. Одним из возможных вариантов является изготовление внедряемого КЭ с утолщенной частью «копья», примыкающей к цилиндрической части КЭ – «с утолщенными плечиками» (рисунок 38).

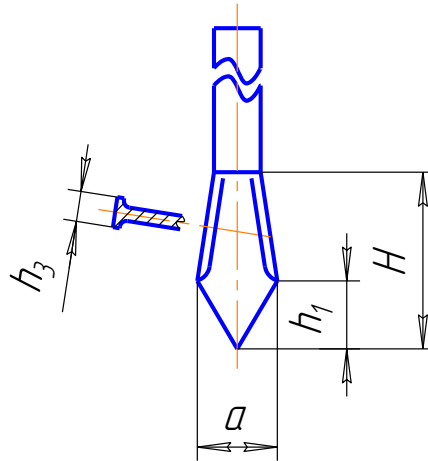


Рисунок 38 – Вариант конструкции КЭ с утолщенными плечиками

КЭ можно изготовить из низкоуглеродистой стальной проволоки с помощью обычных слесарных инструментов, а в больших количествах – с помощью холодной объемной штамповки (ХОШ).

В технологиях ХОШ широко применяется технологическая операция, целью которой является заострение одного из концов цилиндрического стержня. Классическим примером является «заострение» гвоздя при высадке, а также плющение стержня для изготовления слесарных отверток. Кроме того, положительным моментом является и то, что при холодной деформации происходит деформационное упрочнение, следствием которого является повышение предела прочности всех металлических сплавов в $1,5 \div 2,5$ раза, в зависимости от химического состава.

Реализация и обработка ПФЭ 2² по определению влияния геометрии соединения (лопатообразного КЭ) на осевую выдергивающую нагрузку

Таблица 10 – План эксперимента и результаты его обработки

№ опыта	\hat{x}_1	\hat{x}_2	Результаты параллельных опытов			\bar{y}	S_i^2	значения коэф-ов уравнения регрессии		%	
			$(y_i)_1$	$(y_i)_2$	$(y_i)_3$						
1	+	+	2034	2043,1	1774,7	1950,600	23226,310	b0	1633,121	-	
2	-	+	1503,7	1313,4	1440	1419,033	9383,223	b1	300,904	89,907	
3	+	-	1850,3	1984,6	1917,45	1917,450	4509,122	b2	51,696	2,654	
4	-	-	1266,2	1224,6	1245,4	1245,400	432,640	b12	-35,121	1,225	
							$\sum_{i=1}^N S_i^2$	37551,296		$\sum \%$	89,907

Примечание:

- коэффициенты уравнения регрессии, отброшенные, как не значимые.

Проверка гипотезы однородности дисперсии опытов:

$$G_{0,05;2;4}^{табл} = 0,6841; G^{расч} = \frac{S_{i \max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} = \frac{23226,310}{37551,296} = 0,6185.$$

Т.к. $G^{расч} < G_{0,05;2;4}^{табл}$, то с доверительной вероятностью 95% и соответствующим числом степеней свободы принимаем гипотезу об однородности дисперсий.

Дисперсия воспроизводимости опытов (отклика):

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N S_i^2 = \frac{37551,296}{4} = 9387,824.$$

Величина доверительного интервала для коэффициентов уравнения регрессии: число степеней свободы, с которыми определяется дисперсия воспроизводимости отклика $f = N \cdot (n-1) = 4 \cdot (3-1) = 8$; табличное значение коэффициента Стьюдента $t_{0,5;8} = 2,3060$;

$$\Delta b_i = t_{0,5;8} \cdot \sqrt{\frac{S_y^2}{f}} = 2,3060 \cdot \sqrt{\frac{9387,824}{8}} = 78,99.$$

Таким образом, коэффициенты регрессии значимы с доверительной вероятностью 95%, если их абсолютная величина больше величины доверительного интервала

$$78,99 \leq |b_i|.$$

Для более объективной оценки влияния факторов и их взаимодействия на отклик регрессионный анализ результатов многофакторного эксперимента дополнен дисперсионным анализом, выполняемым по стандартной методике [105-108]. Модель является адекватной, если сумма эффектов факторов и их взаимодействий описывает 85 % дисперсии отклика. При выполнении дисперсионного анализа необходимости проверять адекватность полученной модели нет, так как суммарный процент дисперсий отклика 89,907 %, что больше 85 %. Следовательно, учтены все факторы и их взаимодействия, существенно влияющие на отклик.

Обработка многофакторного эксперимента позволила получить следующее уравнение регрессионного анализа с кодированным масштабом уровней факторов:

$$y(F_{в \max}) = 1633,121 + 300,904x_1(a) + 51,696x_2(l_3) - 35,121x_1x_2(al_3). \quad (4.10)$$

Анализ уравнения регрессии, показывает, что:

- при увеличении ширины лопатки внедряемого элемента увеличивается нагрузка, которую выдерживает изучаемое соединение;
- при увеличении глубины внедрения стального элемента в композитный материал нагрузка, которую выдерживает изучаемое соединение, также увеличивается, но незначительно.

Ранжирование эффектов факторов по t - критерию (критерию Стьюдента) приведено в приложении Г, рисунок Г.1.

Для использования в расчетах уравнения регрессионного анализа необходимо представить в натуральном масштабе факторы, используя для этого формулы связи кодированных уровней факторов с натуральными:

$$x_1 = \frac{a - x_1^0}{\Delta x_1} = \frac{a - 6,5}{1,5}, \quad x_2 = \frac{l_3 - x_2^0}{\Delta x_2} = \frac{l_3 - 21,5}{3,5}, \quad (4.11)$$

С учетом вышеизложенного, расчетная модель принимает вид (в работе не отброшены незначимые факторы):

$$F_{в\max} = -923,245 + 344,43a + 58,25l_3 - 6,69al_3. \quad (4.12)$$

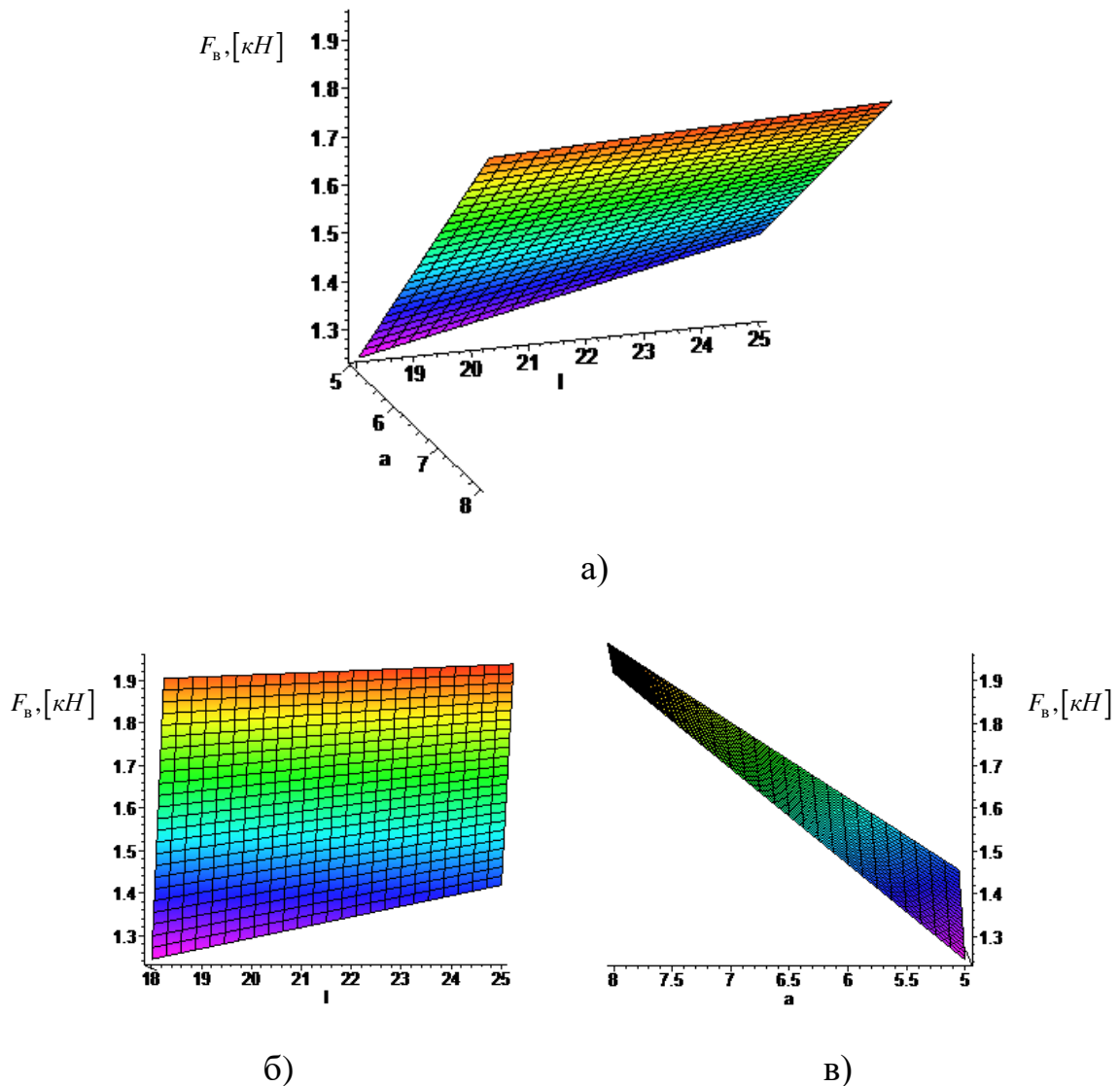


Рисунок 39 – Зависимость нормального усилия разрушения соединения от геометрии соединения (ширины лопатки и глубины внедрения КЭ в тело ПКМ)

а) поверхность отклика; б) $F_{в\max}(l_{загл})$; в) $F_{в\max}(a)$

Подставляя в полученное уравнение соответствующие значения параметров соединения (ширины лопатки внедряемого элемента $a, [мм]$ и глубины внедрения

(заглубления) стального элемента в композитный материал $l_3, [мм]$) можно получить прогнозируемую максимальную нормальную (выдерживающую) нагрузку $F_{в\max}, [Н]$, которую выдерживает изучаемое соединение. На рисунке 39 показана поверхность отклика.

Дисперсионный анализ (рисунок Г.2, приложение Г) более чувствителен к влиянию того или иного фактора и позволяет определить вклад факторов и их взаимодействия в дисперсию отклика. Дисперсионный анализ результатов ПФЭ 2^2 показывает, что:

- 89,907 % вариации дисперсии отклика (нагрузка, которую выдерживает изучаемое соединение) вызвано влиянием фактора x_1 (ширина лопатки внедряемого элемента);
- вклад фактора x_2 (глубина внедрения стального элемента в композитный материал) составляет 2,654 %;
- вклад взаимодействия этих факторов составляет 1,225 %;

Таким образом, наиболее ощутимое влияние на нормальную нагрузку, которую выдерживает изучаемое соединение [110], оказывает ширина лопатки внедряемого элемента, причем влияние этого фактора в 34 раза сильнее влияния глубины внедрения стального элемента в композитный материал. Кроме того, дисперсионный анализ показывает, что уравнение регрессии объясняет 89,907 % дисперсии отклика. Это означает, что учтены все факторы и их взаимодействия, существенно влияющие на отклик. Итак, результаты регрессионного и дисперсионного анализа качественно совпадают.

4.2.3. Результаты изучения прочности соединения под действием нормальной силы

Проведенное лабораторное тестирование [109, 110] показало, что наиболее рациональным конструктивно-технологическим решением соединения деталей, изготовленных из ПКМ с металлическими частями конструкций (из

рассмотренных), находящихся под действием нормальной (выдергивающей) силы, являются соединения при помощи КЭ с законцовкой в форме копьеобразной (лопатообразной) пластины с утолщенными плечиками. Причем с увеличением ширины лопатки внедряемого элемента увеличивается нагрузка, которую выдерживает изучаемое соединение, а увеличение глубины внедрения такого КЭ оказывает незначительное воздействие на ее увеличение и в проектировочных расчетах может выбираться по технологическим соображениям.

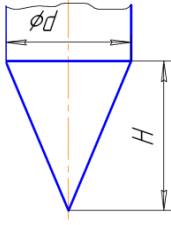
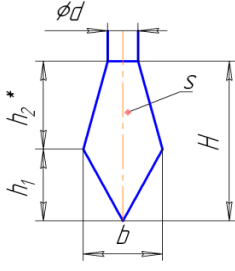
4.3. Изучение влияния расположения крепежных элементов на прочность соединения «сталь-композит» под действием осевой силы

Вторая серия экспериментов, в ходе которой определялись сравнительные характеристики соединений для выявления рационального расположения КЭ в теле ПКМ, была направлена на исследование характера разрушения соединения под действием осевой (сдвигающей) силы вдоль соединяемых поверхностей.

4.3.1. Изучение влияния формы и расположения крепежных элементов в теле ПКМ на срез

В рамках проведенного лабораторного тестирования определялись сравнительные характеристики данных соединений для выявления рационального расположения КЭ в ПКМ, а также выявления характера разрушения КЭ двух типов игольчатого КЭ – как наиболее часто применяемого и штифта с законцовкой в форме копьеобразной (лопатообразной) пластины – как показавшего лучшие результаты при изучении поведения соединения под действием нормальной силы [109]. Результаты эксперимента для удобства анализа сведены в таблицу 11, а в качестве оценки прочностных свойств указанного соединения введен эмпирический коэффициент j_r , определяемый из выражения 3.13.

Таблица 11 – Результаты тестирования соединений «сталь-ПКМ» на срез

КТР	Вид наконечника КЭ	Тип образца (расположение КЭ)	$j_{\tau} = \frac{F}{H}$
Игольчатый элемент		1	481
		2	711
		3	536
Копьеобразная (лопатообразная) пластина		1	791
		2	1171
		3	883

Анализ полученных данных (см. таблицу 11) показывают, что соединения на основе КЭ с копьеобразной (лопатообразной) законцовкой выдерживают сдвиговые нагрузки приблизительно в 1,5 раза больше, чем аналогичные соединения на основе игольчатых КЭ. Следует отметить, что разрушение таких соединений происходит путем срезания цилиндрической части крепежного элемента по плоскости соединения, в то время как игольчатые крепежные элементы вырываются из тела композита. Кроме того, максимальное значение j_{τ} достигается при рядном размещении КЭ. Это свидетельствует о том, что при равной глубине заделки наиболее прочное соединение дает копьеобразная (лопатообразная) форма законцовки крепежного элемента при их рядном расположении.

Кроме того, ряд образцов, для уточнения поведения КЭ был изготовлен с закреплением КЭ по прессовой посадке, вместо предложенного изначально резьбового соединения. Анализ всех образцов после разрушения показал, что независимо от способа крепления КЭ в металлической (стальной) пластине, целостность этого соединения не была нарушена. Разрушался либо сам КЭ, либо ПКМ. Таким образом, для крепления КЭ на металлической части конструкции

можно рекомендовать прессовую посадку с применением эпоксидного клея (для повышения надежности указанного соединения). Отсутствие резьбы повысит технологичность изготовления разрабатываемого соединения «сталь-композит»

4.3.2. Изучение влияния расположения КЭ по отношению к сдвигающей нагрузке

При проведении тестирования для соединения типа «пакет» (вид образцов, см. рисунок 30) записывались диаграммы деформирования. Вид диаграмм деформирования приведен на рисунке 40.

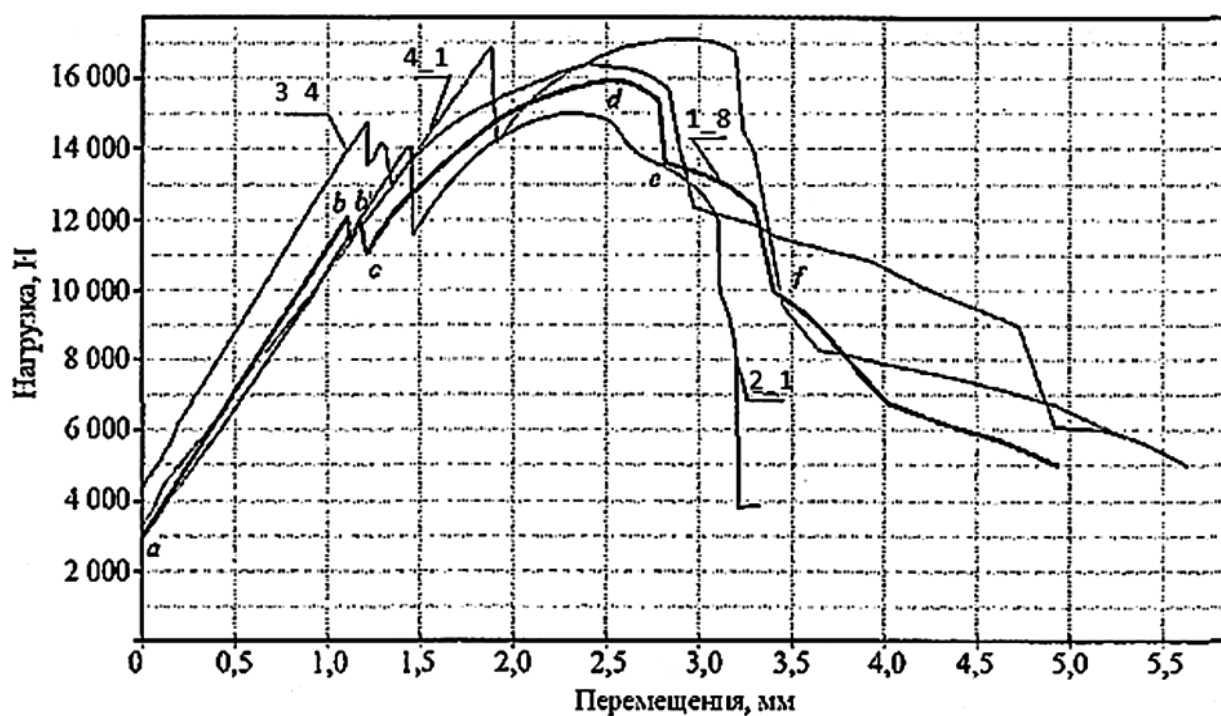


Рисунок 40 – Диаграммы нагружения для образцов представителей:

1_8 – образец 1-ой группы; 2_1 – образец 2-ой группы; 3_4 – образец 3-ей группы;
4_1 – образец 4-ой группы (вторая цифра – номер образца в группе)

Анализ полученных диаграмм (рисунок 40) показывает, что разрушение образца происходит ступенчато.

Сначала увеличение нагрузки не разрушает образец (участок ab диаграммы), при достижении пиковой нагрузки (точки b, b') происходит срез

шестого и пятого КЭ (участок bc диаграммы). При этом в первой (образец 1_8) и третьей (образец 3_4) группах срез КЭ происходит поочередно, а в четвертой (образец 4_1) и во второй группах (образец 2_1) – одновременно (точки b, b' совпадают).

За счет перераспределения нагрузки начинают работать следующие два КЭ (участок cd диаграммы). В образцах первой и третьей групп происходит либо срез третьего и четвертого КЭ, либо их выпрессовка из металлической пластины. В образцах второй и четвертой групп – либо изгиб КЭ, с последующим перерезыванием волокон основы ПКМ и, как следствие, разрушением соединения, либо их выпрессовка из металлической пластины (участок de диаграммы).

При дальнейшем нагружении образца происходит окончательное разрушение соединения (участок ef диаграммы). В образцах первой, третьей и четвертой групп происходит выпрессовка третьего и четвертого КЭ из металлической пластины, в образцах второй группы повторяется характер разрушения третьего и четвертого КЭ.

В результате анализа полученных данных определялась (рисунок 40):

1. сила начала разрушения такого соединения (срез первого КЭ) – F_{mik} (соответствует первому «пику» на диаграмме разрушения – точка b);
2. максимальное сдвигающее усилие, выдерживаемое данным соединением – $F_{сдmax}$ (точка d), при расположении на диаграмме $F_{сдmax}$ ниже точки b за максимальное принималось пиковое значение силы.

Результаты эксперимента сведены в таблицу Д.1, приложение Д.

Статистическая обработка результатов

В процессе определения величины пиковой и максимальной нагрузок, выдерживаемых изучаемыми соединениями, получены выборки, обработка которых проводилась в программе Minitab 17. Цензурирование выборок выполнено при помощи контрольных карт, согласно ГОСТ Р 50779. 40 -96 (Приложение Д) [122,123].

Определение закона распределения

После цензурирования получены выборки одинакового объема $n = 30$. В связи с тем, что с увеличением числа наблюдений в выборке закон распределения случайной величины стремится к нормальному [102], проведена проверка полученных значений на нормальность (по критерию согласия Андерсона-Дарлинга). Эмпирическая функция распределения на вероятностной сетке представлена в Приложении Д, рисунок Д.3.

Для выбранной модели плотность распределения F_i и функция распределения:

$$p(F_i) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right), \quad F = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^u \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt,$$

где обозначено $u = \frac{F_i - a}{S}$;

F_i - F_{mik} или $F_{сдmax}$ соответственно;

a - параметр формы распределения;

S - СКО.

Для нормального распределения математическое ожидание, согласно [113]:

$$m[\tilde{F}_i] = a.$$

Представителем случайной величины является среднее значение ($\overline{F_{mik}}$ или $\overline{F_{сдmax}}$ соответственно). Результаты расчета сведены в таблицу 12.

Таблица 12 – Величины пиковой и максимальной нагрузок
в Н

группа	\overline{F}_{muk}	$\overline{F}_{сдmax}$
1	12076,8	15382,8
2	13872,2	15746,5
3	13714,7	16086,6
4	16916,5	17308,0

Проверка дисперсий полученных выборок на однородность

В связи с тем, что было принято предположение о нормальности распределения полученных экспериментальных значений, для определения равенства среднеквадратических отклонений (СКО) в группах использовался критерий Бартлетта.

В условиях проводимого исследования статистики Бартлетта $B_{muk} = 3,87$ и $B_{max} = 7,44$ соответственно, а квантиль χ^2 - распределения с $(k-1)=3$ степенями свободы, при уровне значимости $\alpha = 0,05$: $\chi^2_{2,0,05} = 7,815$.

Таким образом, с доверительной вероятностью $P=0,95$ гипотеза об однородности ряда дисперсии не отвергается и их можно усреднять. По указанным группам можно провести сравнение средних и проанализировать результаты опытов.

Определим погрешность проведения эксперимента (данные для расчета см. приложение Д, таблицы Д.2 – Д.3). Дисперсия воспроизводимости опытов, характеризует погрешность эксперимента в целом:

$$\text{для } F_{muk} : S_y^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N S_i^2 = \frac{845740}{4} = 211435 ;$$

$$\text{для } F_{сдmax} : S_y^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N S_i^2 = \frac{195740}{4} = 48935 .$$

Определим полосу неопределенности, с помощью t - критерия (критерия Стьюдента). Величина полосы неопределенности:

$$\text{для } F_{\text{нук}} : \quad \Delta_{\alpha, f} = t_{\alpha, f} \cdot \sqrt{\frac{S_y^2}{f}} = 1,9799 \cdot \sqrt{\frac{211435}{120}} = 83,108 \text{ Н};$$

$$\text{для } F_{\text{сдmax}} : \quad \Delta_{\alpha, f} = t_{\alpha, f} \cdot \sqrt{\frac{S_y^2}{f}} = 1,9799 \cdot \sqrt{\frac{48935}{120}} = 39,982 \text{ Н},$$

где $t_{\alpha, f} = t_{0,95,120} = 1,9799$ – табличное значение коэффициента Стьюдента;

$f = N \cdot n = 4 \cdot 30 = 120$ – число степеней свободы, с которыми определяется дисперсия воспроизводимости отклика.

Таким образом, абсолютная погрешность проведения эксперимента (измерения случайной величины $F_{\text{нук}}$): $\omega = 2\Delta_{0,95,120} = 2 \cdot 83,108 = 166,216 \text{ Н};$

(измерения случайной величины $F_{\text{сдmax}}$): $\omega = 2\Delta_{0,95,120} = 2 \cdot 39,982 = 79,964 \text{ Н}.$

Относительная погрешность проведения эксперимента (измерения случайной величины $F_{\text{нук}}$ и $F_{\text{сдmax}}$) $\varepsilon = \frac{\Delta_{\alpha, f}}{y_i} \cdot 100\%$ около 1,5%, что соответствует

высокой точности в технических измерениях.

Тест на равенство средних

Однофакторный дисперсионный анализ проведен для всех 4 групп образцов по $F_{\text{нук}}$ и $F_{\text{сдmax}}$ соответственно. При сравнении попарно анализ проведен только для близких значений – 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4 группы. Результаты представлены в приложении Д.

Дисперсионный анализ результатов показал, что в группах 2 и 3 отсутствуют значимые различия между средними значениями $F_{\text{нук}}$, следовательно, при расположении КЭ под углами 0° и $\pm 45^\circ$ (поочередно) средние значения $F_{\text{нук}}$ принадлежат одной генеральной совокупности и группы 2 и 3 можно объединить. Однако, при сравнении средних по $F_{\text{сдmax}}$, такой картины не наблюдалось, что дало основание оставить условия эксперимента без изменений. В остальном результаты в расхождении исследуемых нагрузок вызваны именно разницей условий в группах, а не отклонением, в результате нестабильности эксперимента.

Таким образом, рассмотренные группы являются независимыми в статистическом смысле.

Обработку полученных экспериментальных данных удобно представить в виде диаграммы, рисунок 41.

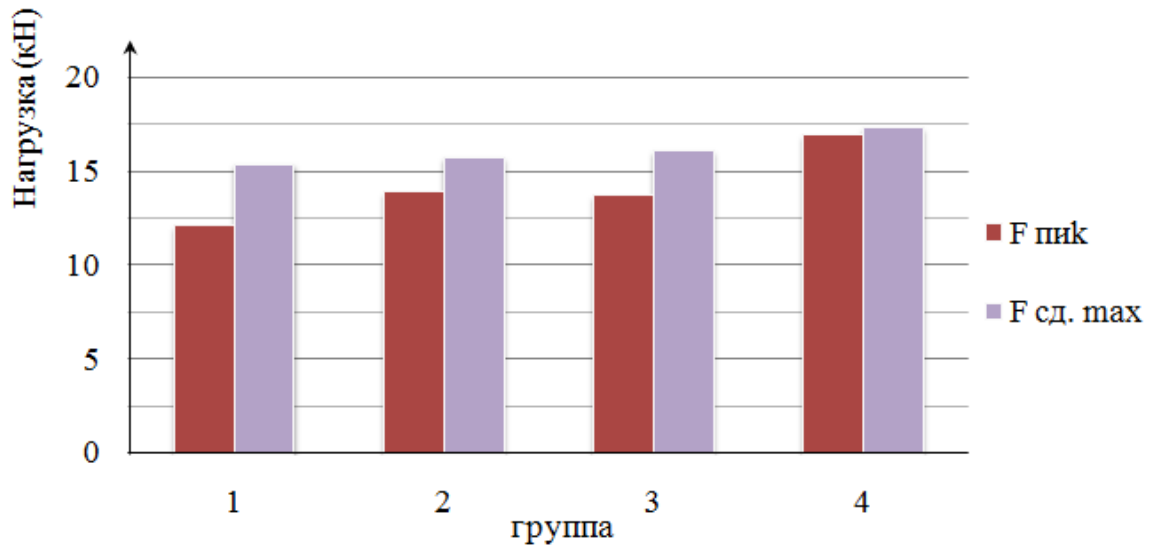


Рисунок 41 – Нагрузка, выдерживаемая образцом в зависимости от расположения КЭ по отношению к сдвигающей силе

Кроме того, проектировочный расчет (согласно предложенной методике расчета п.2.2.2) предполагается проводить по $F_{мик}$, так как именно при этом значении сдвигающей силы происходит разрушение соединения в месте расположения первого КЭ. Однако эксперимент подтверждает, что в большинстве случаев оставшиеся КЭ продолжают удерживать конструкцию еще некоторое время (локальное разрушение не снижает несущую способность соединения в целом), $F_{сдmax} > F_{мик}$, что при расчете по $F_{мик}$ добавляет соединению определенный запас прочности.

В соответствии с этим для применения полученных результатов на практике введем безразмерный коэффициент K_p , отражающий влияние геометрии расположения закладного крепежного элемента на работоспособность соединения

«сталь-композит» под действием сдвигающей нагрузки, результаты сведены в таблицу 13.

Таблица 13 – Значения коэффициента K_p

группа	\overline{F}_{nuk} , Н	K_p
1	12076,8	1,00
2	13872,2	1,15
3	13714,7	1,14
4	16916,5	1,40

Анализ результатов проведенного эксперимента показал, что при расположении плоскости лопатки КЭ под углом 45° к сдвигающей силе (параллельно друг другу), нагрузка, выдерживаемая образцом до начала разрушения соединения на 15...40 % выше, чем при расположении плоскости лопатки КЭ вдоль этой силы или перпендикулярно к ней. Такое расположение КЭ более технологично с точки зрения выполнения крепления, чем расположение со сменой угла, и дает лучшие показатели по выдерживаемой нагрузке, согласно экспериментальным данным.

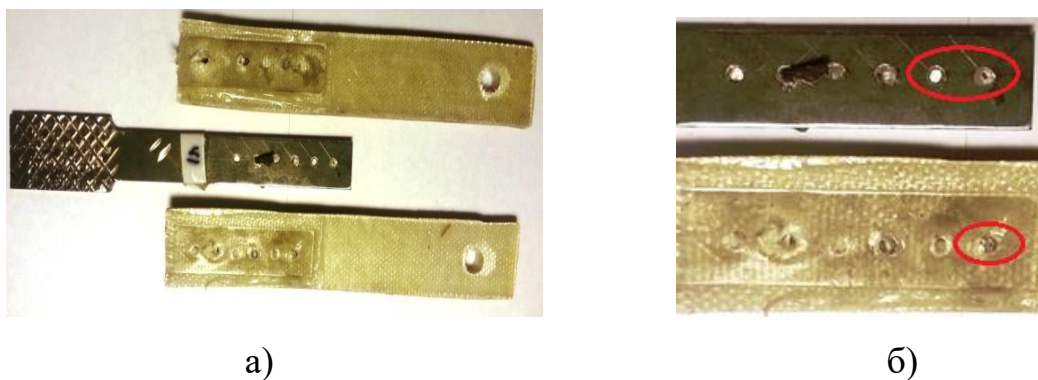


Рисунок 42 – Образец метало-композитного соединения после разрушения – (а); вид разрушения (срез с вырывом КЭ) – (б)

Кроме того, анализ всех образцов после разрушения, не зависимо от взаимного расположения КЭ, показал, что в начале разрушения происходит срез крайнего справа КЭ (рисунок 42б), что позволяет выполнять проектировочный расчет таких соединений по методике, предложенной выше (п.2.2.2). Наконец, увеличение выдерживаемой сдвигающей нагрузки при проектировочном расчете соединения «сталь-композит» можно учесть полученным эмпирическим коэффициентом K_p .

4.3.3. Результаты изучения прочности соединения под действием осевой силы

Проведенное тестирование [111] показало, что наиболее рациональным конструктивно-технологическим решением соединения деталей, изготовленных из ПКМ с металлическими частями конструкций (из рассмотренных), находящихся под действием осевой (срезающей) силы, являются соединения с рядным расположением КЭ с законцовкой в форме копьеобразной (лопатообразной) пластины, расположенных под углом к сдвигающей нагрузке параллельно друг другу.

4.4. Выводы

В рамках диссертационного исследования разработано клеештифтовое соединение композитных и металлических частей конструкций на основе КЭ специальной формы. Проведена серия экспериментов для определения влияния формы наконечника КЭ, расположения КЭ и геометрии изучаемого соединения при нагружении нормальной (выдергивающей) и осевой (срезающей) силами.

Результаты проведенных экспериментов [109, 111] позволяют сделать следующие выводы:

- наиболее рациональным КТР соединения «сталь-композит» из рассмотренных, является соединение КЭ с законцовкой в форме копьеобразной (лопатообразной) пластины с утолщенными плечиками;
- увеличение ширины лопатки КЭ приводит к увеличению выдерживаемой нагрузки, а изменение глубины внедрения КЭ оказывает незначительное воздействие и, следовательно, в проектировочных расчетах может выбираться по технологическим соображениям;
- набор подобных КЭ, запрессованных в металлическую пластину в виде гребенки можно использовать в конструкциях соединений «сталь-композит», работающих на сдвиг или находящихся в сложном напряженном состоянии, при этом расчет таких соединений производится на срез КЭ, а оптимальное расположение плоскости лопатки КЭ в конструкции – под углом к сдвигающей нагрузке – учитывается полученным эмпирическим коэффициентом K_p (таблица 13).

Полученные данные позволяют рекомендовать вновь разработанные метало-композитные соединения на основе КЭ с законцовкой в форме копьеобразной (лопатообразной) пластины для соединения существующих металлических и вновь создаваемых композитных деталей при модернизации или восстановлении сельхозмашин.

5. Уточнение методики расчета соединения «сталь-композит»

5.1. Исследование разрушения соединения «сталь-композит» под действием растягивающей силы

Изучение рассматриваемого случая нагружения (рисунок 27), позволило вывести эмпирическую форму для максимальной разрушающей силы $F_{B\max} [H]$ (см. п.4.2.2):

$$F_{B\max} = -923,245 + 344,43a + 58,25l_3 - 6,69al_3, \quad (5.1)$$

где $a, [мм]$ – ширина лопатки КЭ;

$l_3, [мм]$ – глубина внедрения КЭ в ПКМ.

Данное выражение справедливо при следующих ограничениях: ширина лопатки КЭ варьируется в пределах от 5 до 8 мм; глубина внедрения стального КЭ в ПКМ – до 25 мм.

Анализ полученной формулы показывает, что увеличение ширины лопатки приводит к значительному росту $F_{B\max}$, а глубина внедрения КЭ не оказывает существенного воздействия на $F_{B\max}$.

В процессе проведения исследования установлено, что срез или вырыв первого КЭ происходят практически при одинаковом усилии

$$F_p = (0,8 \div 1,2) F_{B\max}, \quad (5.2)$$

где F_p - разрушающая сдвигающая нагрузка – срез первого КЭ с одновременным началом разрушения адгезионного слоя;

$F_{B\max}$ - максимальное нормальное (выдергивающее) усилие, выдерживаемое КЭ.

Основным ориентиром расчета на прочность данного соединения можно считать срез первого КЭ с небольшим отрывом деталей 1 и 2 друг от друга (начало разрушения клеевого слоя).

5.2. Проверка адекватности предложенной методики расчета

Сравним результаты расчета на прочность для соединения типа «пакет», представленного на рисунках 14б, 18 на основании предложенной усовершенствованной методики расчета, с результатами эксперимента (таблица 13), вид образцов представлен на рисунках 30 и 31.

Исходные данные [23, 24]:

для стальных деталей 1 и 3

$$\sigma_{u1,3} = 390 \text{ МПа}; E_{1,3} = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа};$$

$$\tau_{u1,3} = 230 \text{ МПа}; (\sigma_u)_{1см} = (\sigma_u)_{3см} = 390 \text{ МПа};$$

$$\delta_1 = 5 \text{ мм}; b_1 = 20 \text{ мм};$$

$$d = 3 \text{ мм}; t = 10 \text{ мм};$$

для деталей из ПКМ на основе стеклоткани и связующего (ЭД-6)

$$\sigma_{u2} = 110 \text{ МПа}; E_2 = 10^3 \text{ МПа};$$

$$\delta_2 = 10 \text{ мм}; b_2 = 30 \text{ мм};$$

для эпоксидного клея $\tau_{uK} = 10 \text{ МПа}$.

На основании выражения (2.2) определим силу, необходимую для среза шести КЭ:

$$Q_{cp} = \tau_{u3} A = \tau_{u3} \cdot n \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 230 \cdot 6 \cdot \frac{3,14 \cdot 3^2}{4} = 9750 \text{ Н}.$$

$$\text{На один КЭ в среднем приходится } Q = \frac{Q_{cp}}{6} = \frac{9750}{6} = 1625 \text{ Н}.$$

Определим сминающие силы для материала листа 1, КЭ из (2.3), и для детали из ПКМ 2 с учетом (2.4):

$$N_1 = \sigma_{u1,3} \cdot \delta_1 \cdot d = 390 \cdot 5 \cdot 3 = 5850 \text{ Н};$$

$$\sigma_{2см} = 325 - 25 \cdot \frac{d}{\delta_2} = 325 - 25 \cdot \frac{3}{10} = 332,5 \text{ МПа};$$

$$N_2 = \sigma_{2см} \cdot \delta_2 \cdot d = 332,5 \cdot 10 \cdot 3 = 9975 \text{ Н}.$$

Так как $\frac{t(t')}{d} = \frac{10}{3} = 3,33$, то условие прочности на срез от детали до края (или до следующего ряда) можно не учитывать.

Определим силу, при которой произойдет разрыв соединяемых листов:

$$N_1 = \delta_1 (b_1 - n_1 d_1) \sigma_{u1} = 5 \cdot (20 - 1 \cdot 3) \cdot 390 = 33150 \text{ Н} ;$$

$$N_2 = \delta_2 (b_2 - n_2 d_2) \sigma_{u2} = 10 \cdot (30 - 1 \cdot 3) \cdot 110 = 29700 \text{ Н} .$$

На основании вышеизложенного за расчетный случай принимаем срез КЭ с отрывом клеевого слоя между деталями 1 и 2.

Вначале найдем коэффициент перенапряжения K и, отсюда, определим наиболее нагруженный перерезывающей силой КЭ.

Рассчитаем податливость листов и КЭ. Для определения податливости КЭ в проектировочном расчете воспользуемся результатами, полученными в [65], для пирамидального элемента (наиболее близкий по форме к исследуемому КЭ) и подтвержденными экспериментально $C_{\Pi} \approx 0,3 \frac{\text{мм}^3}{\text{кН}}$:

$$C = \frac{C_{\Pi}}{A_{\text{КЭ}}} = \frac{4C_{\Pi}}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 3^2} = 4,24 \cdot 10^{-5} \frac{\text{мм}}{\text{Н}} ;$$

$$\Pi_1 = \frac{t}{E_1 A_1} = \frac{10}{2 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 20} = 0,05 \cdot 10^{-5} \frac{\text{мм}}{\text{Н}} ;$$

$$\Pi_2 = \frac{t}{E_2 A_2} = \frac{10}{10^3 \cdot 10 \cdot 30} = 3,33 \cdot 10^{-5} \frac{\text{мм}}{\text{Н}} .$$

Коэффициенты канонических уравнений метода сил определяются из (2.20)

в виде:

$$\delta_{11} = \delta_{22} = \delta_{33} = \delta_{44} = 2(\Pi_1 + \Pi_2 + C) = 2(0,05 + 3,33 + 4,24) \cdot 10^{-5} = 15,24 \cdot 10^{-5} \frac{\text{мм}}{\text{Н}} ;$$

$$\delta_{13} = \delta_{31} = \delta_{24} = \delta_{42} = -C = -4,24 \cdot 10^{-5} \frac{\text{мм}}{\text{Н}} ;$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = \delta_{23} = \delta_{32} = \delta_{34} = \delta_{43} = \Pi_1 = 0,05 \cdot 10^{-5} \frac{\text{мм}}{\text{Н}} ;$$

$$\delta_{14} = \delta_{41} = 0 \frac{\text{мм}}{\text{Н}} ;$$

$$\Delta_{1F} = \Delta_{2F} = 2F\Pi_1 = 0,1F \cdot 10^{-5} \text{ мм};$$

$$\Delta_{3F} = 0,5(4\Pi_1 + C)F = 0,5(4 \cdot 0,05 + 4,24)F \cdot 10^{-5} = 2,22F \cdot 10^{-5} \text{ мм};$$

$$\Delta_{4F} = 0,5(3\Pi_1 + C)F = 0,5(3 \cdot 0,05 + 4,24)F \cdot 10^{-5} = 2,195F \cdot 10^{-5} \text{ мм}.$$

Окончательно система уравнений (2.21) с найденными коэффициентами $\delta_{11} \div \Delta_{4F}$, будет:

$$\begin{cases} 15,24X_1 + 0,05X_2 - 4,24X_3 + 0,1F = 0; \\ 0,05X_1 + 15,24X_2 + 0,05X_3 - 4,24X_4 + 0,1F = 0; \\ -4,24X_1 + 0,05X_2 + 15,24X_3 + 0,05X_4 + 2,22F = 0; \\ -4,24X_2 + 0,05X_3 + 15,27X_4 + 2,195F = 0. \end{cases}$$

Решая ее на ЭВМ способом Гаусса с использованием процедуры Холецкого получим:

$$\begin{cases} X_1 = -0,051F; \\ X_2 = -0,050F; \\ X_3 = -0,159F; \\ X_4 = -0,157F. \end{cases}$$

Знак «минус» говорит о том, что направления $X_1 \div X_n$ противоположны предполагаемым изначально.

Тогда, согласно (2.24) перерезывающие силы в КЭ:

$$\begin{cases} Q_1 = X_1 = 0,051F; \\ Q_2 = X_2 = 0,050F; \\ Q_3 = X_3 - X_1 = (0,159 - 0,051)F = 0,108F; \\ Q_4 = X_4 - X_2 = (0,157 - 0,050)F = 0,107F; \\ Q_5 = 0,5F - X_3 = (0,5 - 0,159)F = 0,341F; \\ Q_6 = 0,5F - X_4 = (0,5 - 0,157)F = 0,343F. \end{cases}$$

$$Q_{\max} = Q_6 = 0,343F, \text{ откуда согласно (2.6) } K = \frac{Q_{\max}}{F} = 0,343,$$

то есть шестой КЭ перегружен с коэффициентом $K = 0,343$ и разрушается при общей нагрузке на детали 1 и 2

$$F = \frac{Q}{K} = \frac{1625}{0,343} = 4737,6 \text{ Н}.$$

Так как разрушающаяся нагрузка F_p включает в себя и адгезионную составляющую F_K , найдем силу среза клеевого слоя из (2.25):

$$F_K = \tau_{uK} \cdot A_K = \tau_{uK} \cdot \left(b \cdot l - n \frac{\pi d^2}{4} \right) = \\ = 10^7 \cdot 0,5 \left(0,02 \cdot 0,075 - 0,25 \cdot 6 \cdot 3,14 \cdot 0,003^2 \right) = 7463,8 \text{ Н}.$$

Окончательно нагрузка разрушения соединения типа «пакет» с 6 КЭ F_p :

$$F_p = F + F_K = 4737,6 + 7463,8 = 12201,4 \text{ Н}.$$

Начало разрушения соединения при проведении эксперимента, согласно Таблице 13 (группа 1), происходит при $F_{nuk} = 12076,8 \text{ Н}$, $K_p = 1,0$.

Сравним полученные значения:

$$\delta = \frac{|F_p - F_{nuk}|}{F_p} \cdot 100\% = \frac{12201,4 - 12076,8}{12201,4} \cdot 100\% = 1,02\%.$$

Модельные расчеты производились с использованием программного пакета системы компьютерной алгебры Maple15. Расхождение между значениями, полученными с помощью математической модели и экспериментальными данными – 1,02%, что позволяет сделать вывод об адекватности предложенной методики.

5.3. Выводы

На основе принципа независимости действия сил предложена усовершенствованная методика расчета, удовлетворяющая всем условиям прочности, позволяющая выполнить достаточно простой проектировочный расчет

данного соединения с ограничениями: отношение $\frac{t(t')}{d} \geq 2,8...6$; ширина лопатки

КЭ варьируется в пределах $5 \div 8 \text{ мм}$, а глубина внедрения стального КЭ в ПКМ – $18 \div 25 \text{ мм}$. Для соединения типа «пакет» вводятся дополнительные ограничения: число КЭ в верхнем и нижнем рядах одинаково и общее число КЭ n – четное, для нечетного n коэффициенты системы канонических уравнений (2.23) изменятся.

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{cp} = \frac{KQ_{cp}}{K_p A} \leq \tau_{adm}, \\ \sigma_{1cm} = \frac{N_1}{\delta_1 \cdot d} \leq (\sigma_{adm})_{1cm}, \\ \sigma_{2cm} = 325 - 25 \cdot \frac{d}{\delta_2} \leq (\sigma_{adm})_{2cm}, \\ \sigma_{pi} = \frac{N_i}{\delta_i (b_i - m_i d_i)} \leq (\sigma_{adm})_{pi}, \\ F_{Bmax} = -923,245 + 344,43a + 58,25l_3 - 6,69a \cdot l_3, \\ \tau_K = \frac{F_K}{A_K} \leq \tau_{Kadm}, \end{array} \right. \quad (5.3)$$

В результате обработки полученных ранее экспериментальных данных для расчета изучаемых соединений введены поправочные коэффициенты:

- K_p - коэффициент, учитывающий расположение плоскости лопатки КЭ по отношению к приложенной нагрузке;
- K - коэффициент перенапряжения КЭ в рассматриваемом ряду, найденный на основе метода сил.

С целью подтверждения эффективности применения вновь разработанной методики для проектировочных расчетов первого приближения проведена проверка путем сравнения экспериментальных данных и расчетных значений для соединения типа «пакет», которая показала ее адекватность. Для соединения типа «нахлестка», составлен алгоритм проектировочного расчета клеештифтовых металло-композитных соединений на основе метода сил, которым можно воспользоваться при проектировании ряда стандартных соединений («сэндвич», «уголок с листом», «тавр с листом», «швеллер с листом» и т.д.) с любым количеством КЭ.

Вновь разработанный простой и эффективный метод расчета на прочность изготовленных металло-композитных узлов, позволяет проводить их проектирование не только при серийном производстве в условиях завода, но и в мастерских по ремонту сельскохозяйственной техники, не требует высококвалифицированного персонала и дорогостоящего оборудования.

6. Пример реализации результатов исследования и их технико-экономическая оценка

При эксплуатации сельскохозяйственных машин часто возникает вопрос продления их ресурса в случае, когда используемая машина определенной марки снята с производства и закончен выпуск основных запасных частей (в частности, корпусных агрегатов больших габаритов).



а)



б)



в)

Рисунок 43 – Комплекс зерно- и кормоуборочной техники «Простор»

а) прицепной кормоуборочный комбайн ПН-420 «Простор»;

б) прицепной кормоуборочный комбайн ПН-400 «Простор»;

в) зерноуборочный комбайн ПН-100 «Простор»

Например, после реорганизации в 2010г. ОАО «Тульский комбайновый завод» (ОАО «ТукЗ») целый ряд машин (рисунок 43), достаточно широко

применяемых сельхозтоваропроизводителями (среди которых мелкие фермеры и индивидуальные предприниматели, финансовые ресурсы которых ограничены), оказался снят с производства, что привело к дефициту запасных частей, и, как следствие, к проблемам технического сервиса. В настоящее время ряд агрегатов отсутствует даже на вторичном рынке сельскохозяйственной техники³².

В сложившейся ситуации решением может стать замена поврежденных механическим воздействием или коррозией стальных деталей на полностью изготовленные в условиях ремонтной мастерской подобные детали на основе новых, более технологичных и менее энергоемких материалов.

6.1. Технологические рекомендации

В результате обобщения материалов теоретических и экспериментальных исследований предлагается возможный вариант восстановления тонкостенных деталей сельскохозяйственной техники путем применения стеклокомпозитов и металло-композитных соединений, на примере облегченной конструкции тонкостенной корпусной детали «конфузор» кормоуборочного комбайна ПН-420 «Простор» (рисунок 43а, 44). Объект для восстановления предложен Барановым А.А., д.т.н., профессором, директором ОАО «ТукЗ» в связи с довольно большим объемом рекламаций от заказчиков, поступавших в процессе выпуска комбайна. Технические характеристики ПН-420 приведены в приложении Ж.

Прицепной специализированный кормоуборочный комбайн ПН-420 «Простор» (рисунок 43, а; 44) предназначен для скашивания, измельчения и погрузки многолетних и сеяных трав, а также других культур. Скошенная и измельченная масса, под действием центробежной силы инерции, полученной от вращающихся ножей ротора, попадает в конфузор (1), где ее поток сужается и затем, проходя через силосопровод (2), выгружается в транспортное средство.

³² По вопросу возможности приобретения запасных частей был сделан ряд запросов, на которые получены отрицательные ответы. Ответ на запрос из Технического центра «Агрит» (ИП Попова В.А.) – официального дилера ООО «Комбайновый завод Ростсельмаш» в Калужской и Тульской областях, занимающийся, кроме всего прочего, поставками запасных частей на различные виды сельскохозяйственной техники, см. приложение Е.

Нижняя часть конфузора жестко крепится по контуру к раме корпуса (4) комбайна, а сверху к нему крепится силосопровод. Этот узел представляет собой консоль, которая жестко закреплена на раме, и несет статические (под действием собственной силы тяжести деталей и узлов конфузора и силосопровода) и динамические (связанные с вибрацией при вращении измельчающего ротора, и при копировании во время движения неровной поверхности поля) нагрузки.

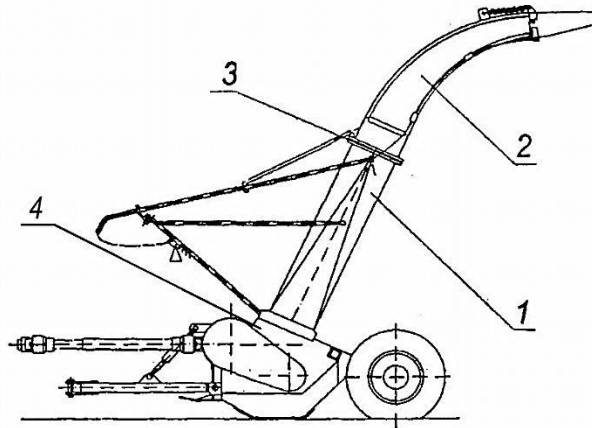


Рисунок 44 – Схема комбайна ПН-420 «Простор»

1 – конфузор; 2 – силосопровод; 3 – поворотный узел; 4 – корпус

Как отмечалось выше, еще в процессе выпуска комбайна на ОАО «ТукЗ» поступали рекламации от заказчиков, на основе которых был выявлен ряд конструктивных недостатков машины. В частности, в результате действия динамических нагрузок, наблюдалось разрушение материала конфузора и силосопровода в местах сварных соединений и в зонах концентрации напряжений. Существенной проблемой являлся абразивный износ, при прохождении скошенной и измельченной массы через конфузор и силосопровод, а также низкая коррозионная стойкость деталей, что приводило к снижению ресурса данного узла.

Исходя из этого, а также учитывая отсутствие запасных частей, необходимо найти рациональное конструктивное решение, позволяющее устранить перечисленные проблемы, а также снизить массу конструкции при одновременном сохранении функциональных качеств и себестоимости изделия

при ремонте на уровне, обеспечивающем конкурентоспособность в рыночных условиях.

Использование машины в реальных условиях показало, что трехлетняя эксплуатация комбайна при заготовке сенажа приводит к интенсивному коррозионному износу мест крепления фланцев и кронштейнов системы управления поворотом силосопровода, а также оболочки самого конфузора. Его сложная форма, учитывающая аэродинамику потока воздуха, переносящего измельченный груз, предполагает изготовление данного агрегата при серийном производстве с помощью специальной оснастки и точных слесарно-сварочных работ. В результате на заводе был создан отдел изучения применения новых технологий для устранения данной проблемы. Работа проводилась совместно с кафедрой ФН5 «Теоретическая механика» КФ ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана при поддержке Министерства образования РФ (грант 01.2003.313430) [92]. Так как производство комбайна в настоящее время прекращено полученные результаты предлагается применить в области ремонта [125].

Изготовление копии конфузора возможно на основе «мокрого» способа соединения расшлифованных листов стеклоткани, пропитанных, например, смесью эпоксидной смолы, отвердителя, пластификатора и растворителя, наложенных на повторяющую внутренний объем конфузора модель, и достаточно подробно описано в работах [23, 24, 39, 41].

В работе [41] обоснован выбор трехслойной оболочки «сэндвич» для изготовления конфузора из ПКМ в условиях серийного производства на заводе-изготовителе. Оболочки типа «сэндвич» представляют собой два относительно тонких внешних слоя, называемых несущими, связанных слоем заполнителя, толщина которого больше толщины несущих слоев, однако прочностные характеристики и плотность ниже. Заполнитель служит для увеличения момента инерции оболочки путем увеличения расстояния между несущими слоями, при этом, по возможности, он не должен увеличивать массу конструкции. Выбором материалов несущих слоев и заполнителя можно варьировать эксплуатационные характеристики таких оболочек (например, обеспечить виброзащиту) [23,24].

В условиях ремонтной мастерской вариант трехслойной оболочки – «сэндвич» с использованием несущих слоев из стекловолокна и заполнителя – войлока СВМ не является оптимальным, поэтому можно обойтись многослойной конструкцией из листов КМ [125].

Как уже отмечалось, узел «конфузор–силосопровод» предназначен для передачи потока скошенной и измельченной массы, частицы которой в результате взаимодействия со стенками конструкции приводят к их абразивному изнашиванию. В то же время наружная поверхность конфузора подвержена воздействию вредных факторов окружающей среды. Стеклопластик, предложенный для изготовления деталей узла, не обладает стойкостью к абразивному изнашиванию, поэтому возникает необходимость в качественном защитном покрытии поверхности к действию подвижных абразивных сред.

Эмали, выпускаемые промышленностью, не пригодны для использования в качестве защиты от абразивного износа и малопригодны для защиты стеклопластика от воздействия окружающей среды. Чтобы окрасить готовую деталь и защитить её от внешних воздействий, применяют специальный материал – гелькоут. Он представляет собой смолу, к которой добавлен краситель. Еще одна функция гелькоута – продление срока службы изделия, защита его от неблагоприятных внешних воздействий и маскировка структуры стеклопластика. Благодаря гелькоуту готовое изделие получается с ровной поверхностью, окрашенной в требуемый цвет.

С помощью порошковых наполнителей можно не только окрашивать гелькоут, но и значительно изменять его механические характеристики. Для обеспечения коррозионной стойкости и снижения абразивного износа в рамках диссертационного исследования, рекомендуется применять гелькоут с добавлением ультрадисперсного порошка корунда или бемита [22,126-127].

Если корпусную деталь больших габаритов требуется изготовить в одном экземпляре, что характерно для ремонтных работ, то расходы на изготовление модели и формы не окупаются. Модель – это временное изделие, по которому надо отформовать деталь точно такой же формы, очертания и отделки. (Если

требуется получить наружное очертание детали, применяется модель, имеющая ее внутреннюю форму - вставка) [24, с.40-41].

Вместе с тем технология изготовления одноразовой модели для выкладки оболочки конфузора может быть весьма проста, и основана на заполнении внутреннего объема, снятого с комбайна, изношенного конфузора, например, смоченными водой обрезками досок и монтажной пеной, применяемой для установки оконных блоков (альтернативой может являться технология изготовления папье-маше на основе гипса). После полимеризации модели, используемый изношенный корпус конфузора срезается, модель шлифуется, покрывается эпоксидным лаком (приемлемыми покрытиями для моделей являются также шлифованные грунт-шпатлевки и различные герметики) и может быть применена при изготовлении композитного корпуса конфузора.

С целью повышения износостойкости внутренней поверхности изготавливаемого ремонтного конфузора первый лист, накладываемый на одноразовую модель, предварительно обработанную антиадгезионной смазкой (парафином), пропитывается связующим с добавлением порошка бемита или корунда в соотношении³³ 60% смолы на 40% мелкодисперсного наполнителя по технологии, изложенной в [125].

Внешнюю поверхность покрывают гелем на основе смолы и порошка красителя. (Гелькоут должен быть достаточно жидким, для получения более равномерного слоя его лучше наносить краскопультом или с помощью специального оборудования, рассмотренного в п. 1.3. Внешний слой гелькоута, выполняющий роль краски, наносится после извлечения изделия из матрицы).

Наиболее сложный вопрос – выполнение соединения нового конфузора со стальными агрегатами комбайна – корпусом (4) и силосопроводом (2) (рисунок 44).

Принимая во внимание результаты работ [128-130], предлагается сформировывать указанные соединения на основе стальных фланцев, срезанных с

³³Данное соотношения является оптимальным для органических частиц, переносимых струей воздуха (измельченной травяной массы), по данным исследований свойств ПКМ на базе Государственного Научного центра РФ ОАО «ОНПП» Технология [92].

изношенного корпуса конфузора и закрепленных на композитном аналоге с помощью вновь разработанного металло-композитного соединения «нахлестка» (рисунок 14, а). При этом соединение стальной 1 и композитной 2 частей осуществляется на основе крепежных элементов (КЭ) 3 и эпоксидного клея 4 в «мокрое» состоянии, с помощью вакуумной технологии.

Технологически осуществление такого соединения довольно просто. КЭ можно изготовить из низкоуглеродистой стальной проволоки с помощью обычных слесарных инструментов, а в больших количествах – с помощью холодной объемной штамповки (ХОШ). При холодной деформации происходит деформационное упрочнение, следствием которого является повышение предела прочности всех металлических сплавов в $1,5 \div 2,5$ раза, в зависимости от химического состава. Цилиндрические части КЭ обрабатываются эпоксидным клеем и закрепляются по прессовой посадке в отверстиях, просверленных в стальном листе, соединение композитного и стального листов производится последовательным вдавливанием острых кромок КЭ в «мокрый» композитный лист. Для обеспечения надежного склеивания, в слой препрега непосредственно контактирующий с металлом дополнительно вводится эпоксидный клей во избежание возникновения «голодного» соединения и как следствие, низкой адгезионной прочности. Вакуум создается внутри полиэтиленового мешка при помощи насоса.

С целью сохранения взаимного расположения деталей комбайна относительно друг друга предлагается использовать шаблонно-стапельную сборку, широко применяемую в авиации и судоремонтных работах [131-132]. Стапель в виде деревянной рамы, выполненный перед разборкой ремонтируемого изделия (по шаблону) поможет обеспечить геометрические параметры взаимного пространственного положения элементов конструкции (корпуса конфузора из ПКМ и присоединяемых металлических фланцев): соосность, взаимную перпендикулярность привалочных плоскостей и др. После изготовления ремонтной детали из ПКМ сборку выполняют в стапеле агрегата; из-за стесненных условий и ограниченного доступа здесь также преобладают ручные работы и

производительность труда не высока.

6.2. Проектирование и инженерный расчет соединения «конфузор – ремонтный фланец»

Основополагающим в изготовлении металло-композитного соединения является технология его проектирования. Она должна быть построена на достаточно простом расчете на прочность, который смог бы провести любой инженер-механик, вооруженный персональным компьютером.

При проектировании деталей из ПКМ имеющих прототип, изготовленный из металла, производят приближенный расчет толщины оболочки, согласно [41]:

$$\frac{\delta_{км}}{\delta_{ст}} = \sqrt{\frac{E_{ст}}{E_{км}}} \quad (6.1)$$

где: $\delta_{км}, E_{км} = 10 ГПа$ – толщина и модуль упругости оболочки из ПКМ [23, 28];

$\delta_{ст} = 2 мм, E_{ст} = 200 ГПа$ – толщина и модуль упругости стальной оболочки.

Таким образом, приближенная толщина стенки конфузора, изготовленного из ПКМ:

$$\delta_{км} = \delta_{ст} \sqrt{\frac{E_{ст}}{E_{км}}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{200}{10}} \approx 8,5 мм.$$

Расчет соединения «нахлестка» проводится по методике, описанной выше. Система уравнений (5.3), дополняется определением коэффициента перенапряжения K для определения наиболее нагруженных перерезывающей силой КЭ согласно (2.15-2.16).

КЭ конфузора (1) в месте его стыка с фланцем, прикрепляемым болтами к основанию (4), работают на срез и на отрыв, при действии момента от сил тяжести самого конфузора G_k , силопровода G_c и переносимого сыпучего груза G_k (рисунок 45). Разгружающий эффект ферменного подкрепления, управляющего поворотным узлом 3 устройства, в запас можно не учитывать.

Суммарный момент $M_{\Sigma} = M_G + M_{(G'+G_k)}$ у основания конфузора будет создавать силу $F' = \frac{M_{\Sigma}}{l}$, а сумма всех сил тяжести в проекции на ось X даст срезающую силу $2F$ (учитываются 2 продольных ряда КЭ по оси X) (см. рисунок 14, а).

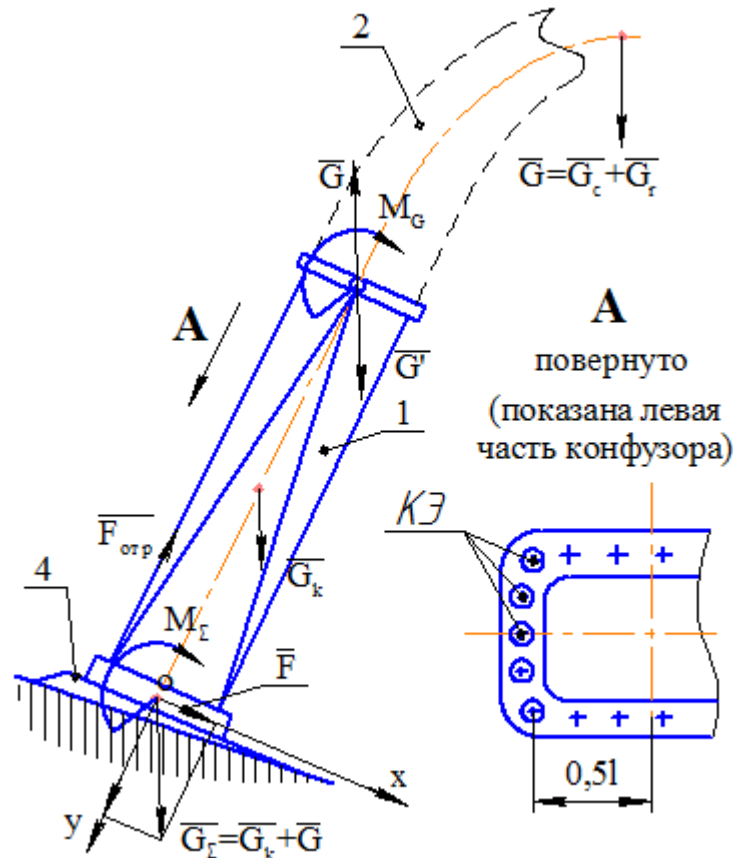


Рисунок 45 – Расчетно-силовая схема конфузора 1

В запас можно предположить, что отрывающая сила $F_{отр} = (F' - G_{\Sigma y})$ равномерно распределена по всем КЭ поперечного ряда крепления композитной части конфузора к стальному фланцу, обозначенными знаком \oplus на рисунке 45 (вид А).

Обозначим число таких КЭ – z , тогда сила, вырывающая один КЭ:

$$F_{КЭ} = \frac{F_{отр}}{z}. \quad (6.2)$$

Из (5.3), на основе эмпирической формулы (5.1) можно определить, выдержит ли данное соединение внешнюю нагрузку $F_{отр}$, т.е.

$$F_{в max} < F_{КЭ}. \quad (6.3)$$

Уточним методику (5.3) для расчёта на прочность клее-штифтового соединения (с помощью эпоксидного клея и стальных копьеобразных КЭ) композитной части конфузора – 1 кормоуборочного комбайна со стальным ремонтным фланцем (рисунок 45):

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{ср} = \frac{KQ_{ср}}{K_p A} \leq \tau_{adm}, \\ \sigma_{1см} = \frac{N_1}{\delta_1 \cdot d} \leq (\sigma_{adm})_{1см}, \\ \sigma_{2см} = 325 - 25 \cdot \frac{d}{\delta_2} \leq (\sigma_{adm})_{2см}, \\ \sigma_{pi} = \frac{N_i}{\delta_i (b_i - m_i d_i - k_i D_i)} \leq (\sigma_{adm})_{pi}, \\ F_{в max} = -923,245 + 344,43a + 58,25l_3 - 6,69a \cdot l_3 < F_{КЭ}, \\ \tau_K = \frac{F_K}{A_K} \leq \tau_{Kadm}, \end{array} \right. \quad (6.4)$$

где $Q_{ср}$ средняя перерезывающая сила, действующая на КЭ, определяется делением F на число КЭ в одном ряду (определение K ведется с учетом половины срезающей силы F для одного продольного ряда КЭ, а срез КЭ поперечного ряда учитывается их податливостью в крайних КЭ продольного ряда, которая будет равна $0,5zC$);

k_i, D_i - количество и диаметр отверстий под крепеж в стальных фланцах, срезанных с изношенного корпуса конфузора и закрепленных на композитном аналоге с помощью вновь разработанного металло-композитного соединения;

$F_{КЭ}$ определяется из выражения (6.2) с учетом отрывающей силы у основания конфузора и сил тяжести конфузора, силосопровода и переносимого сыпучего груза.

Предложенная, как вариант, оболочечная конструкция из ПКМ нуждается в проверочном расчете на прочность, так как приближенный расчет толщины стенки является ориентировочным. Конфузор представляет собой тонкостенную оболочку сложной конфигурации, расчет на прочность которой сводится к определению прочностных показателей во всех точках поверхности, для определения зон концентрации напряжений.

Был использован МКЭ на базе программного продукта MSC/NASTRAN для анализа НДС конфузора [133-138]. В качестве граничных условий модели задавалась жесткая заделка по контуру крепления конфузора к раме. На конфузор действует нагрузка от веса переходника и силосопровода, которая упрощенно задавалась равномерно распределенной по цилиндрической части горловины. Также учитывалось объемное нагружение от собственного веса конструкции. Коэффициент динамичности 2,5.

Конечноэлементная сетка состоит из плоских элементов топологии QUAD4. Толщина по всей модели 8,5 мм. Закреплена модель по нижнему контуру: запрещены линейные перемещения по трем координатным осям. Нагружение: собственный вес имитировался инерционной нагрузкой с ускорением 10м/с^2 под углом 73° к продольной оси конфузора. Вес транспортируемого сенажа ($\approx 330\text{кг}$) прикладывался равномерно к 28 конечным элементам верхней обечайки также под углом 73° к продольной оси.

Анализ напряженно-деформированного состояния, проведенный методом конечных элементов на базе программного продукта MSC/NASTRAN, показал, что максимальные эквивалентные напряжения в ремонтном конфузоре, отличающимся от своего прототипа, выполненного из металла, только толщиной стенки, назначенной согласно (6.1), возникают по верхнему фланцу и не превышают 10 МПа, что меньше допустимых напряжений для выбранного материала ($\sigma_g = 60\dots 70\text{МПа}$) в шесть раз.

Так как уровень напряжений ниже 60% от предельного, то влияние климатического старения, согласно [94], незначительно.

Расчетная схема конфузора, а также распределение эквивалентных напряжений и суммарных перемещений в конфузоре приведены в приложении Ж, рисунки Ж.1, Ж.2.

Таким образом, в окончательной конструкции конфузора, выполненного из композиционного материала возможно назначение толщины стенки по упрощенному расчету (6.1).

6.3. Экономический расчет

Одним из основных недостатков металлических оболочечных конструкций является низкая износостойкость поверхности к абразивному износу, что приводит к значительному снижению срока службы изделия и вместо положенных 8...10 лет, в 7% случаев поломка происходит раньше. При использовании ремонтного конфузора из ПКМ с покрытием гелкоутом срок службы можно продлить, следовательно, все комбайны доработают свой ресурс без поломки [92] По данным исследования [193] только в период с 2000 года по 2004 год хозяйствам агропромышленного комплекса Российской Федерации реализовано 186 единиц комбайнов «Простор» ПН-420.

1. Расчет цены ремонтного конфузора из стали³⁴.

Полная себестоимость изделия определяется по формуле:

$$S_{\text{полн}} = \left[(S_m + S_n) + L \left(1 + \frac{k_1 + k_2 + k_3}{100} \right) + L \frac{\alpha}{100} + \left(L + L \frac{\alpha}{100} \right) \frac{\beta}{100} \right] \left(1 + \frac{k_4}{100} \right), \quad (6.5)$$

где S_m – затраты на основные материалы (для конфузора $S_m = 5034$ руб.);

S_n –затраты на вспомогательные материалы, берутся из расчета до 10% от основных (для конфузора $S_n = 503,4$ руб.);

L –расходы на основную заработную плату производственных рабочих;

³⁴ при условии выполнения его на машиностроительном предприятии Калужской области. Все коэффициенты для расчета себестоимости, а также уровень заработной платы основных производственных рабочих даны по среднему значению с учетом сложности выполнения поставленной задачи на неспециализированном предприятии.

k_1 – процентное отношение расходов по содержанию оборудования,
 $k_1=10\%$;

k_2 – процентное отношение общецеховых расходов, $k_2=430\%$;

k_3 – процентное отношение общезаводских расходов, $k_3=46,8\%$;

k_4 – процентное отношение внепроизводственных расходов, $k_4=56,6\%$;

α – производственное отношение дополнительной заработной платы,
 $\alpha=19\%$;

β – процент отчислений на социальное страхование основных
 производственных рабочих, $\beta=32,8\%$.

Расходы на основную заработную плату производственных рабочих,
 рассчитывается по тарифным ставкам при сдельной оплате труда и с учетом норм
 времени на изготовление одного конфузора:

$$L = \frac{L_{cd}}{F_{op}} T_{изз}, \quad (6.6)$$

где L_{cd} – основная заработная плата рабочих при сдельной оплате труда
 ($L_{cd}=57000$ руб.);

F_{op} – действительный фонд рабочего времени ($F_{op}=176$ н.-час/мес.);

$T_{изз}$ – трудоемкость изготовления одного изделия, ($T_{изз}=42,6$ н.-час).

$$L = \frac{57000}{176} \cdot 42,6 = 13800 \text{ руб.}$$

Тогда из (5.5) имеем для конфузора:

$$S_{полн}^{cm} = \left[\begin{aligned} & (5034 + 503,4) + 13800 \cdot \left(1 + \frac{10 + 430 + 46,8}{100} \right) + \\ & + 13800 \cdot \frac{19}{100} + 13800 \cdot \left(1 + \frac{19}{100} \right) \cdot \frac{32,8}{100} \end{aligned} \right] \cdot \left(1 + \frac{56,6}{100} \right) = 148025 \text{ руб.}$$

Отпускная цена завода изготовителя определяется по формуле:

$$Ц = S_{полн} \left(1 + \frac{P + НДС}{100} \right), \quad (6.7)$$

где P – плановый уровень прибыли (ориентировочно 20%);

НДС=18%.

$$C_{cm} = 148025 \cdot \left(1 + \frac{20 + 18}{100}\right) = 204275 \text{ руб.}$$

2. Расчет цены ремонтного конфузора из ПКМ³⁵.

Себестоимость полного изготовления конфузора будет складываться из себестоимости изготовления части из ПКМ и себестоимости изготовления КЭ (в которой учтем также стоимость монтажа, вновь разработанного клеештифтового соединения с дискретными связями). Расчет производится по формуле (6.5) с учетом следующих исходных данных:

- затраты на основные материалы: для конфузора $s_m = 9132$ руб., для КЭ $s_m = 104$ руб.;
- затраты на вспомогательные материалы: для конфузора $s_n = 913,2$ руб., для КЭ $s_n = 10,4$ руб.);
- процентное отношение расходов по содержанию оборудования $k_1 = 10\%$;
- процентное отношение общецеховых расходов $k_2 = 20\%$;
- процентное отношение общезаводских расходов $k_3 = 25\%$;
- процентное отношение внепроизводственных расходов $k_4 = 35\%$;
- производственное отношение дополнительной заработной платы $\alpha = 15\%$;
- процент отчислений на социальное страхование основных производственных рабочих $\beta = 35,8\%$.
- основная заработная плата рабочих при сдельной оплате труда: для конфузора $L_{co} = 35000$ руб., для КЭ $L_{co} = 35000$ руб.
- действительный фонд рабочего времени $F_{op} = 151$ чел.-час/мес.;
- трудоемкость изготовления одного изделия: для конфузора $T_{изг} = 16$ чел.-час., для КЭ $T_{изг} = 20$ чел.-час.

Расходы на основную заработную плату производственных рабочих (6.6):

$$\text{на изготовление конфузора } L = \frac{35000}{151} \cdot 16 = 3700 \text{ руб.,}$$

³⁵ Значения всех коэффициентов, фонда рабочего времени и трудоемкости изготовления указаны согласно [121].

на изготовление и монтаж крепежа $L = \frac{57000}{151} \cdot 20 = 7550$ руб.

Тогда из (6.5) имеем для конфузора:

$$S_{полн}^к = \left[\begin{aligned} &(9132 + 913,2) + 3700 \cdot \left(1 + \frac{10 + 20 + 25}{100}\right) + \\ &+ 3700 \cdot \frac{15}{100} + 3700 \cdot \left(1 + \frac{15}{100}\right) \cdot \frac{35,8}{100} \end{aligned} \right] \cdot \left(1 + \frac{35}{100}\right) = 24109 \text{ руб.},$$

для крепежа:

$$S_{полн}^{кэ} = \left[\begin{aligned} &(104 + 10,4) + 7550 \cdot \left(1 + \frac{10 + 20 + 25}{100}\right) + \\ &+ 7550 \cdot \frac{15}{100} + 7550 \cdot \left(1 + \frac{15}{100}\right) \cdot \frac{35,8}{100} \end{aligned} \right] \cdot \left(1 + \frac{35}{100}\right) = 21679 \text{ руб.},$$

для готового агрегата:

$$S_{полн} = S_{полн}^к + S_{полн}^{кэ} = 24109 + 21679 = 45788 \text{ руб.}$$

Отпускная цена ремонтного предприятия (6.7):

$$Ц_{ПКМ} = S_{полн} \cdot \left(1 + \frac{P + НДС}{100}\right) = 45788 \cdot \left(1 + \frac{20 + 18}{100}\right) = 63487 \text{ руб.}$$

3. Расчёт капитальных затрат.

В общем случае капитальные затраты на внедрение технологии восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники при ремонте ПКМ связаны с изготовлением оснастки (модели конфузора). Расчет себестоимости изготовления оснастки производится по формуле (6.5) с учётом следующих данных:

- затраты на основные материалы $S_m = 3000$ руб.;
- затраты на вспомогательные материалы $S_n = 300$ руб.;
- основная заработная плата рабочих при сдельной оплате труда $L_{сд} = 35000$ руб.;
- действительный фонд рабочего времени в месяце $F_{оп} = 151$ чел.-час.;
- трудоемкость изготовления оснастки конфузора $T_{изз} = 28$ чел.-часов.

Расходы на основную заработную плату производственных рабочих определим из (6.6): $L = \frac{35000}{151} \cdot 28 = 6490$ руб.

Тогда полная себестоимость изготовления оснастки конфузора:

$$S_{осн} = \left[\begin{aligned} & (3000 + 300) + 6490 \cdot \left(1 + \frac{10 + 20 + 25}{100} \right) + \\ & + 6490 \cdot \frac{15}{100} + 6490 \cdot \left(1 + \frac{15}{100} \right) \cdot \frac{35,8}{100} \end{aligned} \right] \cdot \left(1 + \frac{35}{100} \right) = 22957 \text{ руб.}$$

4. Расчёт эксплуатационных затрат.

Эксплуатационные затраты на обслуживание комбайна связаны с мероприятиями по защите от коррозии (покраска). При эксплуатации стальных деталей покраска производится 1 раз в 2 года, тогда как деталям из ПКМ она не требуется вообще.

Стоимость покраски можно определить из (6.5), при этом затратами на основные материалы будет являться стоимость краски, а затраты на вспомогательные материалы отсутствуют. Стоимость покраски рассчитывается по формуле:

$$S_m = G_{кр} C_{кр}, \quad (6.10)$$

где $G_{кр}$ – количество краски, необходимое для покраски конфузора комбайна, $G_{кр} = 1,88$ кг; $C_{кр}$ – стоимость краски, $C_{кр} = 386$ руб./кг (быстросохнущая антикоррозионная долговечная краска по металлу и ржавчине Ammerheim 3в1³⁶).

Тогда $S_m = 1,88 \cdot 386 = 670$ руб.

Расходы на основную заработную плату производственных рабочих определим из (6.6) с учётом следующих данных:

- основная заработная плата рабочих при сдельной оплате труда $L_{сд} = 35000$ руб.;
- действительный фонд рабочего времени в месяце $F_{др} = 151$ чел.-час;
- трудоемкость покраски конфузора $T_{кр} = 2$ чел.-час.

$$L = \frac{35000}{151} \cdot 2 = 463 \text{ руб.}$$

³⁶ Гарантия срока службы от 10 лет, при соблюдении технологии нанесения (по данным производителя). [Электронный ресурс]. URL: <http://kraska-po-metallu.ru/> свободный (дата обращения 26.05.2015)

Из (6.5) получим стоимость покраски конфузора комбайна:

$$S_{полн}^{кр} = \left[726 + 463 \cdot \left(1 + \frac{10 + 20 + 25}{100} \right) + \right. \\ \left. + 463 \cdot \frac{15}{100} + 463 \cdot \left(1 + \frac{15}{100} \right) \cdot \frac{32,5}{100} \right] \cdot \left(1 + \frac{35}{100} \right) = 2276 \text{ руб.}$$

Тогда экономия на обслуживании с учетом качества краски будет:

$$C_{об} = S_{полн}^{кр} = 2276 \text{ руб.}$$

5. Расчет экономического эффекта.

Учитывая все выше изложенное, можно рассчитать предполагаемый экономический эффект от внедрения технологии восстановления конфузора:

$$\mathcal{E} = C_{ст} - C_{ПКМ} - S_{осн} + C_{обс} = 204275 - 63487 - 22957 + 2276 = 120107 \approx 120000 \text{ руб.}$$

6.4. Утилизация отходов

Кроме перечисленных выше аспектов изготовления детали из ПКМ необходимо рассмотреть утилизацию (вторичную переработку) композитной части изделия по окончании срока эксплуатации, а также отходов, возникающих в процессе производства (по данным экспертов до 20%).

Отходы ПКМ, которые состоят из реактопласта и непрерывного стеклянного наполнителя, достаточно трудоемки для утилизации в связи с тем, что разрушение стекловолокна энергозатратно, а его частицы обладают высокой абразивностью, что приводит к быстрому износу оборудования. Для измельчения отходов стеклопластиков используются дезинтеграторы специальной конструкции (например, отечественного производства ИРР-02 или ИЩ-01). За время пребывания в камере дезинтегратора материал разрушается с образованием частиц размером несколько микрон, приобретая совершенно новые физико-химические свойства [55,56].

Полученные в процессе переработки стеклопластиковые порошки называют органоминеральным наполнителем (ОМН), который является не только наполнителем, но и модификатором и возможности его применения достаточно

широки [56,140-141]. ОМН используют, например, в качестве наполнителей в прессовочных композициях на основе реактопластов; для изготовления полимерных покрытий (в том числе лакокрасочных); в клеевых композициях на основе эпоксидных смол; в металлургии; в промышленности стройматериалов; в дорожном строительстве при изготовлении асфальтобитумных смесей; для устройства гидроизоляции промышленных сооружений и пр.

Утилизация крупногабаритных изделий из стеклопластиков заключается в медленном нагреве изделия до 600°C со скоростью 2...5°C/мин без доступа воздуха, в результате которого происходит пиролиз органической части, разрушение композиционного материала, отделение металлических деталей [55]. Получаемые активные угли могут быть использованы в различных областях, включая производство на их основе сорбентов для медицины; в газоочистке выбросов углекислого газа, диоксида серы, окислов азота и пр. [56,142].

В центральной части РФ утилизацией реактопластов занимается ряд предприятий расположенных в г. Москва, при этом приобретение отходов осуществляется по цене около 20руб/кг.

6.5. Выводы

Предложен достаточно простой вариант восстановления тонколистовых деталей в случае, когда используемая машина снята с производства и закончен выпуск основных запасных частей (в частности, корпусных агрегатов больших габаритов) на примере конфузора кормоуборочного комбайна ПН-420 «Простор», позволяющий проводить восстановление детали в условиях ремонтных мастерских, не требующий высококвалифицированного персонала и дорогостоящего оборудования; предполагаемый экономический эффект от внедрения составляет 120 000 руб.

Представленный способ восстановления внедрен:

- в ООО «ДизельПрофРемонт», г. Калуга, при ремонте опытного образца кожуха маховика двигателя внутреннего сгорания Cummins серия L. Во время

пуско-наладочных работ и гарантийного срока (полгода или 1000 моточасов, что наступит раньше) отказа двигателя, по причине недостаточной долговечности восстановленного кожуха или мест присоединения его к стальному корпусу изделия не зарегистрировано (Приложение К);

- в ООО ТЦ «Агрит» – официальный дилер ООО «Комбайновый завод Ростсельмаш» в Калужской, Тульской и Рязанской областях – при восстановлении опытных образцов клапанных крышек дизельных двигателей внутреннего сгорания, устанавливаемых на сельскохозяйственной и автомобильной технике: Cummins QSM 11, Cummins QSX 15, Cummins ISF 2,8/3,8;
- в КФХ «Горячий ключ» при ремонте кормоуборочной техники.

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе КФ ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана при изучении дисциплины «Сопротивление материалов», а также в проектно-конструкторских работах на ОАО «КТЗ», г. Калуга.

Заключение

1. Обосновано использование стеклоткани Т-10; эпоксидной смолы ЭД – 6 с отвердителем ПЭПА и пластификатором ДБФ в качестве компонентов полимерного композиционного материала (ПКМ), что позволяет повысить эффективность восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники в условиях ремонтной мастерской.

2. Исследованием установлено, что покрытие ПКМ гелькоутом с добавлением порошка бемита или корунда в соотношении 60% смолы на 40% мелкодисперсного наполнителя (данное соотношение является оптимальным для органических частиц, переносимых струей воздуха), при ориентации однонаправленных слоев композита минимум в трех направлениях, позволяет повысить поверхностную твердость (в 2 раза) и износостойкость поверхностей сельскохозяйственной техники, выполненных из ПКМ (в 2 раза), подверженных действию подвижного органического сыпучего груза. При этом предел прочности указанного композита $\sigma_g = 60...70$ МПа, а модуль упругости $E = 10$ ГПа.

3. Обоснована рациональная форма крепежного элемента (КЭ) (штифт с копьеобразной законцовкой), позволяющая выполнить комбинированное клеештифтовое соединение существующих металлических и вновь создаваемых деталей и узлов сельхозмашин из ПКМ. Соединения на основе КЭ указанной формы выдерживают сдвиговые нагрузки приблизительно в 1,5 раза большие, чем соединения на основе игольчатых КЭ и нормальные нагрузки в 2 и 3 раза большие, чем аналогичные соединения на основе КЭ с законцовкой в виде треугольной пластины и игольчатых КЭ соответственно.

4. Исследованием установлено, что расположение плоскостей копьеобразной законцовки КЭ под углом 45° к сдвигающей силе параллельно друг другу, увеличивает несущую способность соединения на 20...40%, по сравнению с расположением плоскостей законцовок КЭ вдоль этой силы или перпендикулярно к ней.

5. Обоснованы аналитические зависимости для определения

коэффициента перенапряжения и нормальной силы, выдергивающей КЭ из тела ПКМ, а также эмпирические значения коэффициента расположения КЭ в теле ПКМ, позволяющие установить рациональные параметры соединения «сталь-композит» и оценить эффективность предложенных конструктивных решений для восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники.

6. Разработана упрощенная методика расчета на прочность соединения «сталь-композит» для использования при ремонте сельскохозяйственной техники. Расхождение между экспериментальными данными и расчетным значением – 1,02%, что позволяет сделать вывод об ее адекватности.

7. Предложен возможный вариант реализации результатов исследования. В качестве объекта восстановления выбран конфузор прицепного специализированного кормоуборочного комбайна ПН-420 «Простор». Предложен инженерный расчет соединения «конфузор – ремонтный фланец» с использованием новой методики проектирования. Предполагаемый экономический эффект составляет 120 000 руб./шт.

8. Рассмотрена возможность утилизации (вторичной переработки) композитной части изделия по окончании срока эксплуатации, а также отходов, возникающих в процессе производства.

Список сокращений и условных обозначений

АПК	–	аграрно-промышленный комплекс;
МТП	–	машинно-тракторный парк;
КМ	–	композиционный материал (композит);
ПКМ	–	полимерный композиционный материал;
НДС	–	напряженно-деформированное состояние;
КТР	–	конструкторско-технологическое решение;
ВСЛ	–	высококачественная легированная сталь;
МКЭ	–	метод конечных элементов;
КЭ	–	крепежный элемент;
ПЭПА	–	полиэтиленполиамин;
ДБФ	–	дибутилфталат;
СКО	–	среднеквадратичное отклонение;
С	–	связующее (матрица) – эпоксидная смола с соответствующими добавками пластификатор ДБФ и отвердитель ПЭПА;
ПЭВМ	–	персональная электронно-вычислительная машина;
ПФЭ	–	полный факторный эксперимент;
ОС	–	основная система;
ХОШ	–	холодная объемная штамповка;
ОМН	–	органоминеральный наполнитель.

Список литературы

1. Государственная программа Развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013 - 2020 годы. [Электронный ресурс]: - Утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 14 июля 2012 г. № 717 (в редакции постановления Правительства Российской Федерации от 19 декабря 2014 г. № 1421) / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации: [сайт]. – М., [200-?]. – Режим доступа: <http://www.mcx.ru/navigation/docfeeder/show/342.htm> (06.01.2015), свободный. - Загл. с экрана.
2. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации: [Электронный ресурс]: – Утверждено Указом Президента Российской Федерации от 30 января 2010 г. № 120/ Министерство сельского хозяйства Российской Федерации: [сайт]. – М., [200-?]. – Режим доступа: <http://www.mcx.ru/documents/document/show/12214.19.htm>(06.01.2015), свободный. - Загл. с экрана.
3. Единая межведомственная информационно–статистическая система [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fedstat.ru> (дата обращения: 30.09.2014), свободный. – Загл. с экрана
4. Инновационные направления развития ремонтно–эксплуатационной базы для сельскохозяйственной техники/ С.А. Соловьев, В.П. Лялякин, С.А. Горячев [и др.] – М.: «Росинформагротех», 2014. –154с.
5. Соловьев, С.А.О программе модернизации инженерно–технологического обеспечения АПК/ С.А. Соловьев, С.А. Горячев // Труды ГОСНИТИ – 2014. – Т. 117. – С.9–17.
6. Голубев, И.Г. Отечественные и мировые тенденции в системе технического сервиса/ И.Г. Голубев, В.Д. Митракова // Вестник всероссийского государственного аграрного заочного университета. Научный журнал. – 2007. – №2(7). – С.10–12.

7. Основы политики РФ в области развития науки и технологий на период до 2010 года и дальнейшую перспективу [Электронный ресурс]: офиц. текст – Утверждено Президентом РФ В. Путиным 30 марта 2002г. Пр-576 / Портал «Инновационное развитие регионов» [Министерства образования и науки Российской Федерации](#): [сайт]. – М., [200-?]. – Режим доступа: <http://ris.extech.ru/texts/politique2010.rtf>(30.09.2014), свободный. – Загл. с экрана.
8. Указ Президента Российской Федерации №899 от 7 июля 2011г [Электронный ресурс]: офиц. текст / Президент России [сайт]. – М., [200-?]. – Режим доступа: <http://graph.document.kremlin.ru/page.aspx?1;1563800> (30.09.2014), свободный. – Загл. с экрана.
9. Основы политики РФ в области развития науки и технологий на период до 2020 года и дальнейшую перспективу [Электронный ресурс]: проект текст. / Портал «Инновационное развитие регионов» [Министерства образования и науки Российской Федерации](#): [сайт]. – М., [200-?]. – Режим доступа: http://ris.extech.ru/texts/policy2020_draft.pdf(30.09.2014), свободный. – Загл. с экрана.
10. Авдеев, В. Композиционные материалы: от древних пирамид до современного авиапрома [Электронный ресурс] / В. Авдеев // Умное производство. – 2013. – вып. 24. – Режим доступа: http://www.umpro.ru/index.php?page_id=17&art_id_1=474&group_id_4=110&mid_4=26(25.12.2014), свободный. – Загл. с экрана.
11. Воронина, Ю. Рынок композиционных материалов к 2020 году может вырасти в 10 раз [Электронный ресурс] / Ю. Воронина // РГ-Бизнес (Промышленное обозрение). – 2012. - N864 от 18 сентября. – Режим доступа: <http://www.rg.ru/2012/09/18/materiali.html>(25.12.2014), свободный. – Загл. с экрана.
12. План мероприятий («дорожная карта») «Развитие отрасли производства композитных материалов» [Электронный ресурс]: офиц. текст - Утверждено Распоряжением Правительства РФ от 24 июля 2013 г. № 1307-р / ГАРАНТ.РУ [сайт]: – М., [200-?]. – Режим доступа:

- <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70321648/#ixzz3ORzmac2>(25.12.2014), свободный. – Загл. с экрана.
13. Загашвили, Ю.В. Производство изделий из современных композиционных материалов, модифицированных наноразмерными компонентами / Ю.В. Загашвили, В.И. Кулик, А.С. Орыщенко // Инновации – 2007. – №12. – С.94–98.
14. Холодников, Ю.В. Перспективы развития в России производства композиционных материалов и изделий из них / Ю.В. Холодников // Вестник машиностроения. – 2009. – №8. – С.80–83.
15. Тарханов, Н.С. Что делать для развития производства композитов в России / Н.С. Тарханов, Ю.В. Холодников // Композитный мир. – 2008. – №6 (19). – С.36–41.
16. Конкин, Ю.А. Проблемы воспроизводства сельскохозяйственной техники / Ю.А. Конкин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2005. – №7. – С. 2-5.
17. Черноиванов, В.И. Организация и технология восстановления деталей машин / В. И. Черноиванов, В.П. Лялякин. М.: ГОСНИТИ, 2003. – 488 с.
18. Формирование инфраструктуры инженерно-технологических услуг сельским товаропроизводителям / В. И. Черноиванов [и др.]. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 192 с.
19. Черноиванов, В.И. Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы) / В. И. Черноиванов, И.Г. Голубев. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 376 с.
20. Черноиванов, В.И. Инновационные проекты и разработки в области технического сервиса/ В. И. Черноиванов, В.П. Лялякин, И.Г. Голубев. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 96 с.
21. Черноиванов, В.И. Состояние и перспективы развития технического сервиса машин в АПК/ В. И. Черноиванов // Труды ГОСНИТИ – 2012. – Т. 109. Ч.1. – С.4-8.
22. Сорокина, И.И. Перспективы применения полимерных композитных материалов добавлением нанокристаллических порошков оксида алюминия в

- конструировании и ремонте сельскохозяйственной техники/ И.И. Сорокина, М.В. Астахов // Труды ГОСНИТИ – 2012. – Т. 109. Ч.1. – С.9-12.
- 23.Справочник по композиционным материалам: В 2–х кн. Кн.1 / под ред. Дж. Любина; пер. с англ. А.Б. Геллера и др.; Под ред. Б.Э. Геллера. – М.: Машиностроение, 1988. – 448 с. ил.
- 24.Справочник по композиционным материалам: В 2–х кн. Кн.2 / под ред. Дж. Любина; пер. с англ. А.Б. Геллера и др.; Под ред. Б.Э. Геллера. – М.: Машиностроение, 1988. – 584 с. ил.
- 25.Берлин, А.А. Современные полимерные композиционные материалы (ПКМ)/ А.А. Берлин// Соросовский Образовательный Журнал. – 1995. –№ 1. – С. 57–65.
- 26.Кербер, М.Л. Композиционные материалы/ М.Л. Кербер // Соросовский Образовательный Журнал. – 1999. – № 5. – С. 33–41.
- 27.Кербер, М.Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технологии: Учеб. пособие/ М.Л. Кербер [и др.]; под ред. А.А. Берлина. – 3–е исп. изд. – СПб.: Профессия, 2011. – 560 с., ил.
- 28.Васильев, В.В. Композиционные материалы: Справочник / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин [и др.]; под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. - 512 с.
- 29.Байгильдин, Д.Ю. Обзор существующих современных материалов для восстановления деталей машин / Д.Ю. Байгильдин// Современные наукоемкие технологии. – 2014. – №5. – ч.1. – С. 16-18.
- 30.Курчаткин, В.В. Полимерные композиционные материалы для ремонта сельскохозяйственной техники / В.В. Курчаткин, В.И. Кудрявцев, В.И. Башкирцев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1999. – №9. – С. 24-27.
- 31.Тулинов, А.Б. Новые композиционные материалы для сборочных и ремонтных работ / А.Б. Тулинов, А.Б. Гончаров // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2003. – №7. – С.26-28.
- 32.Тулинов, А.Б. Новые композиционные материалы в ремонтном производстве / А.Б. Тулинов, А.Б. Гончаров // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2003. – №11. – С.46-49.

33. Гончаров, А.Б. Восстановление оборудования композиционными материалами. / А.Б. Гончаров, В.И. Морозов, А.Б. Тулинов // Горное оборудование и электромеханика. – 2006. – №1. – С.31-35.
34. Волков, Г.М. Нетрадиционный ремонт автотракторной техники и оборудования. / Г.М. Волоков, А.Б. Гончаров // Лесная промышленность. – 1997. – №1. – С.24-25.
35. Голубев, И.Г. Перспективы применения полимерных нанокомпозитов / И.Г. Голубев, В.В. Быков // Техника и оборудование для села. – 2012. – №5. – С.9-12.
36. Федоренко, В.Ф. Применение нанотехнологий в техническом сервисе машин / В.Ф. Федоренко // Вестник всероссийского государственного аграрного заочного университета. Научный журнал. – 2007. – №2(7). – С.5–8.
37. Бородулин А.С. Наномодификаторы для полимерных композиционных материалов / А.С. Бородулин // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2012. – №6. – С.51-57.
38. Михайлин, Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы / Ю.А. Михайлин. – СПб.: Научные основы и технологии, 2009. – 660с.: ил.
39. Астахов, М.В. Применение тонкостенных конструкций в сельхозмашиностроении / М.В. Астахов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2003. – №7. – С.25-27.
40. Пузанов, А.Г. AGRITECHNICA – 99: Машины и оборудование для переработки органических отходов / А.Г. Пузанов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2000. – №6. – С.46-48.
41. Астахов, М.В. Композиционные материалы в сельхозмашиностроении / М.В. Астахов, Т.В. Таганцев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2004. – №9. – С.42-44.
42. Тухватуллин, М.М. Рекомендации ООО «Агрополимер» по использованию полимерных материалов в АПК / М.М. Тухватуллин // Техника оборудования для села. – 2001. – №5(47). – С.30 – 31.
43. Астахов, М.В. Научно-методические основы снижения материалоемкости конструкций машин и оборудования в животноводстве и кормопроизводстве: дис. ... д-ра тех. наук / М.В. Астахов. – Калуга, 2002. – 355 с.

- 44.Бутовский, М.Э. Применение композитов для изготовления крупногабаритных деталей трактора / М.Э. Бутовский // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008. – №8. – С.52-53.
- 45.Использование композиционных полимерных материалов при создании новых средств развития транспортной инфраструктуры на примере семейства МТС // Т.Д. Дзоценидзе, М.А. Козловская [Электронный ресурс]: по материалам доклада. POLIMERY.RU [Сайт]. – М., [200-?]. – Режим доступа: http://www.polimery.ru/letter.php?n_id=2765 (дата обращения: 01.01.2015), свободный. – Загл. с экрана.
- 46.Жачкин, С.Ю. Восстановление деталей сельхозмашин методом холодного нанесения гальванических композитных хромовых покрытий: автореф. дис. ... д-ра тех. наук / С.Ю. Жачкин. – Москва, 2005. – 45 с.
- 47.Сивцов, В.Н. Восстановление корпусных деталей комбинированными покрытиями / В.Н. Сивцов, А.В. Котин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2007. – №10. – С.51-53.
- 48.Котин, А.В. Восстановление корпусных деталей машин комбинированными структурными покрытиями / А.В. Котин, В.Н. Сивцов, А.В. Конаков, А.В. Русяев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2012. – №10. – С.47-49.
49. Ли, Р. И. Повышение эффективности восстановления посадочных отверстий корпусных деталей сельскохозяйственной техники при модификации эластомеров / Р.И. Ли, Ф.А. Кирсанов, Д.В. Машин, А.А. Колесников // Труды ГОСНИТИ. – 2013. – Т. 111. – Ч. 2. – С. 134-136.
50. Ли, Р. И. Технологические аспекты повышения эффективности восстановления корпусных деталей автотракторной техники эластомерами / Р.И. Ли, Ф.А. Кирсанов // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – Т. 114.– С. 100-103.
- 51.Козырева, Л.В. Ресурсосберегающие нанотехнологии на предприятиях технического сервиса: монография / Л.В. Козырева. – Тверь: ТГТУ, 2010. – 188 с.
- 52.Курчаткин, В.В. Восстановление посадок подшипников качения сельскохозяйственной техники полимерными материалами: дис. ... д-ра тех. наук / В.В. Курчаткин. – Москва, 1989. – 407 с.

53. Ли, Р. И. Восстановление неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники полимерными материалами: дис. ... д-ра тех. наук / Р.И. Ли – М., 2001. – 340с.
54. Технология полимерных материалов: учеб. пособие / под общ. ред. В.К. Крыжановского. – СПб.: Профессия, 2008. – 533 с.
55. Бобович Б.Б. Переработка промышленных отходов: Учеб. для технол. специальностей вузов. – М.: «СП Интермет Инжиниринг», 1999. – 445 с.
56. Бобович Б.Б., Девяткин В.В. Переработка отходов производства и потребления: справочн. пособ. / Под ред. д.т.н., проф. Б.Б. Бобовича. – М.: «СП Интермет Инжиниринг», 2000. – 496 с.
57. Перегуд Е.А. Санитарная химия полимеров. – Из-во «Химия», Ленинградское отделение, 1967. – 380 с.
58. Вторичная переработка пластмасс / Ф. Ла Мантия (ред.); пер. с англ. под. ред. Г.Е. Зайкова – СПб.: Профессия, 2006. – 400 с.
59. Набер, Б.В. Вторичная переработка полимерных материалов спасет мир/ Б.В. Набер, пер. А.П. Серееenkova // Полимерные материалы. – 2014. – №8. – С.4-10.
60. Нестеров С.П. Новая жизнь реактопластов // С.П. Нестеров // Пластикс. – 2007. – № 1-2 (47-48). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.expoelectro.ru/documents/articles/articles_1.html (дата обращения: 20.04.2015), свободный. – Загл. с экрана.
61. Anna Hedlund-Åström Model for End of Life Treatment of Polymer Composite Materials. Doctoral thesis Department of Machine Design / Anna Hedlund-Åström. - Royal Institute of Technology, Stockholm. – 2005. [Electronic resource]. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:12611/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 01.04.2015), свободный. – Загл. с экрана.
62. Natural, Synthetic, and Recycled Polymers in Composite Materials. / Gonzalo Martínez-Barrera, Osman Gencel, Carmina Menchaca-Campos, and Enrique Viguera-Santiago // Hindawi Publishing Corporation International Journal of Polymer Science. – Volume 2013 – Article ID 389162 – 2 pages. [Электронный

- ресурс]. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/389162> (дата обращения: 01.04.2015), свободный. – Загл. с экрана.
63. Sen, F. Effects of Using Different Metal Materials on Stresses in Metal-Composite Hybrid Joints / Faruk Sen, Kemal Aldas // Cankaya University Journal of Science and Engineering (CUJSE). – 2011. – Vol.8. – №1. – P. 1-13.
64. Бикша, Дж. Использование композитных материалов в оборонной промышленности и аэрокосмической индустрии / Дж. Бикша, пер. В. Рентюк // Вестник электроники. – 2014. – №1. – С.24-27.
65. Карпов, Я.С. Проектирование и конструирование соединений деталей из композиционных материалов: учеб. Пособие по курсовому и дипломному проектированию / Я.С. Карпов, С.П. Кривенда, В.И.Рябков. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1997. – 201с.
66. Карпов, Я.С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов / Я.С. Карпов. – Харьков: ХАИ, 2010. – 767с.
67. Череващенко, А.С. Конструктивно-технологические решения соединений металл-композит, работающие на отрыв / А.С. Череващенко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2012. – Вип.1(73). – С.14-20.
68. Система экспериментального обеспечения расчета на прочность механических соединений деталей из композитов / Е.Т. Василевский, А.З. Двейрин, Я.С. Карпов, С.П. Кривенда // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2010. – №47. – С.42-52.
69. Воробей, В.В. Соединения конструкций из композиционных материалов / В.В. Воробей, О.С. Сироткин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 168с.
70. Ильина, А.Д. Высокопрочные соединения композиционных материалов / А.Д. Ильина, Ю.С. Ильин // Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов, ЦАГИ. – 1979. – Вып.7. – С.42-49.
71. Кутьинов, В.Ф. Расчет клеевых соединений / В.Ф. Кутьинов // Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов, ЦАГИ. – 1979. – Вып.7. – С.14-30.
72. Кутьинов, В.Ф. Расчет клееных комбинированных конструкций из композиционных материалов / В.Ф. Кутьинов // Проектирование, расчет и

- испытания конструкций из композиционных материалов, ЦАГИ. – 1982. – Вып.9. – С.33-47.
- 73.Сироткин, О.С. Проектирование соединений элементов конструкций из композиционных материалов / О.С. Сироткин // Изв. Вузов. Сер. Машиностроение. – 1978. – №2. – С.30-33.
- 74.Вашуков, Ю.А. Особенности сборки деталей из композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов: учеб. пособие / Ю. А. Вашуков. – Самара: Изд-во СГАУ, 2007 (Самара). – 64 с.
- 75.Вашуков, Ю.А. Исследование напряженно-деформированного состояния соединения изделий из композиционных материалов / Ю. А. Вашуков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – Т.11. - №3(2). – С.414-419.
- 76.Gonzalez, D.S. Mechanical behavior of metal-composite joints under impact rates of loading: Thesis ... for the degree of Mechanical Engineering - Master of Science / David S. Gonzalez. - Michigan State University. – 2014. – 80p.
- 77.Корженевский, А.В. Проектирование и экспериментальное исследование прочности клеештифтового соединения деталей из композиционных материалов/ А.В. Корженевский // Вопросы оптимизации тонкостенных силовых конструкций летательных аппаратов. Тематический сборник научных трудов. – Вып.4. – Харьков, 1983. – С.16-20.
- 78.Seidlitz, H. New Joining Technology for Optimized Metal/Composite Assemblies / Holger Seidlitz, Lars Ulke-Winter, and Lothar Kroll // Journal of Engineering. – vol. 2014. – Article ID 958501. – 11 pages. – doi:10.1155/2014/958501. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/958501> (дата обращения: 15.01.2015), свободный. – Загл. с экрана.
- 79.US5958550 A. Z-pin-reinforced sandwich structure [Электронный ресурс]/ James J.Childress; заявители и правообладатель The Boeing Company - № US 08/811,643; заявл. 05.03.1997; опубл. 28.09.1999. – Режим доступа: <http://www.google.com/patents/US5958550> (дата обращения: 30.12.2014), свободный. – Загл. с экрана.
- 80.US6436507 B1.Composites joined with z-pin reinforcement [Электронный ресурс] / Shawn D. Pannell; заявители и правообладатель The Boeing Company -

- № US 09/301,891; заявл. 29 апр. 1999; опубл. 20 авг. 2002. – Режим доступа: <http://www.google.com/patents/US6436507> (дата обращения: 30.12.2014), свободный. – Загл. с экрана.
81. WO2009094595. Metal/composite joint with attachment projections, and method of joining [Электронный ресурс] / WANTHAL, Steven P.; заявители и правообладатель The Boeing Company - № PCT/US2009/031914; заявл. 23.01.2009; опубл. 30.07.2009. – Режим доступа: <http://patentscope.wipo.int/search/en/WO2009094595> (дата обращения: 30.12.2014), свободный. – Загл. с экрана.
82. Yu, Q. Scaling of Strength of Metal-Composite Joints – Part I: Experimental Investigation / Q. Yu, Z.P. Bazant, J.M. Bayldon, J.-L. Le, et al. // ASME J. Appl. Mech. – Vol. 77. – JANUARY 2010. – Article ID 011011. – 8 pages. – DOI: 10.1115/1.3172254. [Электронный ресурс]. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: <http://www.civil.northwestern.edu/people/bazant/PDFs/Papers/492-493.pdf> (дата обращения: 05.01.2015). – Загл. с экрана.
83. Le, J.-L. Scaling of Strength of Metal-Composite Joints – Part II: Interface Fracture Analysis / J.-L. Le, Z.P. Bazant, Q. Yu // ASME J. Appl. Mech. – Vol. 77. – JANUARY 2010. – Article ID 011012. – 7 pages. – DOI: 10.1115/1.3172152. [Электронный ресурс]. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: <http://www.civil.northwestern.edu/people/bazant/PDFs/Papers/492-493.pdf> (дата обращения: 05.01.2015). – Загл. с экрана.
84. Yu, Q. Scaling of Strength of Metal-Composite Joints – Part III: Numerical Simulation / Q. Yu, Z.P. Bazant, J.M. Bayldon, J.-L. Le // ASME J. Appl. Mech. – Vol. 80. – SEPTEMBER 2013. – Article ID 054503. – 4 pages. – DOI: 10.1115/1.4023643. [Электронный ресурс]. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: <http://www.civil.northwestern.edu/people/bazant/PDFs/Papers/523.pdf> (дата обращения: 05.01.2015). – Загл. с экрана.
85. Гончаров, А.Б. Опыт применения передовых технологий с использованием полимерных композиционных материалов на фирме «Мосинтраст» / А.Б. Гончаров // Сварочное производство. – 1999. – №10. – С.48-49.

86. Астахов, М.В. Исследования некоторых механических характеристик композиционных материалов / М.В. Астахов, Ю.А. Мазалов, Т.В. Таганцев // Труды МГТУ «Математическое моделирование сложных технических систем». – 2004. – №588. – С.34-40.
87. Козырева, Л.В. Получение наноматериалов на предприятиях технического сервиса / Л.В. Козырева // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2010. – №9. – С. 27-29.
88. Мазалов, Ю.А. Научно-технические и технологические основы получения и применения нанокристаллических оксидов и гидроксидов алюминия / Ю.А. Мазалов, А.В. Берш, Л.В. Судник, М.В. Астахов // МТС. М.: Издательство ГОСНИТИ. – 2006. – №2 (декабрь). – С. 14-16.
89. Охлопкова, А.А. Полимерные нанокомпозиты антифрикционного назначения / А.А. Охлопкова, А.Г. Парникова, О.В. Глаголева, А.Л. Федоров, С.В. Васильев // IV Всероссийская конференция по наноматериалам. Москва. 01-04 марта 2011г. / Сборник материалов. – М.: ИМЕТ РАН, 2011, 574с. – С. 474.
90. Ковалевская, О.В. Перспективы повышения качества полимерных композиционных материалов за счет добавок нанокерамики / О.В. Ковалевская // IV Всероссийская конференция по наноматериалам. Москва. 01-04 марта 2011г. / Сборник материалов. – М.: ИМЕТ РАН, 2011, 574с. – С. 499.
91. Танцеров, А.А. Электрохимическое формирование окрашенных оксидных наноструктур на алюминии / А.А.Танцеров, А.И. Финаенов, О.В. Фролова, Е.А. Савельева // Международная научная конференция и VIII Всероссийская олимпиада молодых ученых «Наноструктурные, волокнистые и композиционные материалы». Санкт-Петербург. 14 мая 2012г. / Тезисы докладов. – СПб. – 2012г. – С.28.
92. Проектирование и синтез рациональных конструктивно-технологических решений узлов и агрегатов машин, применяемых в животноводстве и кормоводстве, из композиционных материалов: отчет о НИР (заключительный) / МГТУ им. Н.Э. Баумана – Т02-06.9-32.13; № ГР 01.2003.313430. – Калуга, 2004. – 59с.
93. Черноиванов, В.И. Перспективы применения нанотехнологий как прорывного фактора повышения качества обслуживания и ремонта машин /

- В.И. Черноиванов // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2011. – №2. – С.3-10.
94. Мазалов, Ю.А. Результаты исследования применения наноструктурного бемита в различных областях [Электронный ресурс] / Ю.А. Мазалов, Л.В. Судник, А.В. Федотов, А.В. Берш, А.О. Новожилов. – Режим доступа <http://www.rusnor.org/nanoworld/pro/7427.htm>, свободный.
95. Коблов, Е.Н. Климатическое старение материалов авиационного назначения. I Механизмы старения. [Электронный ресурс] / Е.Н. Коблов, О.В. Старцев, А.С. Кротов, В.Н. Кириллов // Деформация и разрушение материалов. – 2010. – №11. – URL: <http://www.viam.ru/public/files/2010/2010-205578.pdf>. (дата обращения 10 февраля 2015).
96. Коблов, Е.Н. Климатическое старение материалов авиационного назначения. II Релаксация исходной структурной неравновесности и градиент свойств по толщине. [Электронный ресурс] / Е.Н. Коблов, О.В. Старцев, А.С. Кротов, В.Н. Кириллов // Деформация и разрушение материалов. – 2010. – №12. – URL: <http://www.viam.ru/public/files/2010/2010-205616.pdf> (дата обращения 10 октября 2015).
97. Коблов, Е.Н. Климатическое старение материалов авиационного назначения. III Значимые факторы старения. [Электронный ресурс] / Е.Н. Коблов, О.В. Старцев, А.С. Кротов, В.Н. Кириллов // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – №01. – URL: <http://viam.ru/public/files/2010/2010-205616.pdf>. (дата обращения 10 октября 2015).
98. Степин, П.А. К расчету на срез соединений с прерывными связями / П.А. Степин // Вестник инженеров и техников. – 1951. – №4. – С. 175-179.
99. Вейбулл, В. Усталостные испытания и анализ их результатов / пер. с англ. под ред. С.В. Серенсена – М.: Машиностроение, 1964. – 275 с. ил.
100. ГОСТ 25.601 - 80. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). – М.: Изд-во стандартов, 2005. – 9 с.
101. Аскадский, А. А. Деформация полимеров / А.А. Аскадский. – М.: Химия, 1973. – 448 с. ил.

102. Боровиков, С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности / С.М Боровиков – Мн.: Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.: ил.
103. Новик, Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с. ил.
104. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений/ П.В. Новицкий, П.А. Зоргаф. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1991. – 304с.: ил.
105. Рыжов, Э.В. Математические методы в технологических исследованиях/ Э.В. Рыжов, О.А. Горленко. Отв. ред. А.Г. Гавриш. – Киев: Наукова думка, 1990. -184с. ил.
106. Строгалева, В.П. Имитационное моделирование: Учеб. Пособие/ В.П. Строгалева, И.О. Толмачева – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 280с.
107. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / пер. с. англ. – М.: Мир, 1978. – 424с.
108. Fisher R.A. The Design of Experiments / R.A. Fisher // ISBN 0028446909 – 9th Edition, Macmillan, 1971.
109. Астахов, М.В., Таганцев Т.В. Экспериментальное исследование прочности соединений «сталь-композит» / М.В. Астахов, Т.В. Таганцев // Труды МГТУ «Математическое моделирование сложных технических систем». – 2006. – №593. – С.125-130.
110. Сорокина, И.И. Исследование влияния формы крепежного элемента на прочность соединения «металл-композит» [Электронный ресурс] / И.И. Сорокина, М.В. Астахов // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2012. – №02. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/308514.html>. свободный (дата обращения 30.09.2014).
111. Астахов, М.В. Проектирование и экспериментальное исследование соединения сталь-композит / М.В. Астахов, И.И. Сорокина, П.И. Хотеев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2011. – спец.

- выпуск «Перспективные конструкционные материалы и технологии». – С.220-226.
112. Козыр, Е.В. Этапы обработки данных при малых выборках [Электронный ресурс]. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://faks.kpi.ua/library/Conferences/MGS-21/p_12.pdf (дата обращения: 5.11.2013) – Загл. с экрана.
113. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей: Учебник для вузов / Е.С. Вентцель. – 10-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2006. – 575с.: ил.
114. Кофанов, Ю.Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронных средств: Учебник для вузов / Ю.Ф. Кофанов. – М.: Радио и связь, 1991. – 360 с.: ил.
115. Потапов, Ю.В. Метод вероятностной бумаги для задачи однородности / Ю.В. Потапов // Вестник Томского государственного университета. – 2002. – №275. – С.216-217.
116. Лемешко, Б.Ю. О применении и мощности критериев проверки однородности дисперсий. Ч. I. Параметрические критерии / Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко, А.А. Горбунова // Измерительная техника. – 2010. – №3. – С. 10-15.
117. Лемешко, Б.Ю. О применении и мощности критериев проверки однородности дисперсий. Ч. II. Непараметрические критерии / Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко, А.А. Горбунова // Измерительная техника. – 2010. – №5. – С.11-18.
118. Hardeo Sahai. The Analysis of Variance: Fixed, Random, and Mixed Models / Hardeo Sahai, Mohammed I. Ageel – Springer Science & Business Media, 2000. – 742p.
119. MacFarland, T.W. Two-Way Analysis of Variance: Statistical Tests and Graphics Using R / Thomas W. MacFarland – Springer Science & Business Media, 2012. – 148p.
120. Веттегрень, В.И. Влияние формы частиц наполнителя на прочность полимерного композита / В.И. Веттегрень, А.Я. Башкарев, М.А. Суслов// Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77. – Вып. 6. – С. 135-138.

121. Лиопо, В.А. К механизму действия допинговых наноразмерных модификаторов в полимерных матрицах / В.А. Лиопо, В.А. Струк, С.В. Авдейчик // Пластические массы. – 2007. - №8. – С.36-41.
122. Адлер, Ю.П. Контрольные карты Шухарта в России и за рубежом: краткий обзор современного состояния (статистические аспекты) [Электронный ресурс] / Ю.П. Адлер, О.В. Максимова, В.Л. Шпер. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: <http://ria-stk.ru/upload/image/stq/2011/N8/082011-1.pdf> (дата обращения: 20.04.2015) – Загл. с экрана.
123. Chang W. Kang. Basic Statistical Tools for Improving Quality. [Electronic resource] / Chang W. Kang, Paul H. Kvam –John Wiley & Sons, Inc. – 2011. –244p. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9781118491751> (дата обращения: 17.04.2015) – Загл. С экрана.
124. Dodson, B. The Weibull analysis handbook / Bryan Dodson. – 2nd ed. ASQ Quality Press. – 2006. – p.167.
125. Астахов, М.В. Возможности применения композитных материалов при модернизации и ремонте сельскохозяйственной техники / М.В. Астахов, И.И. Сорокина // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т.118. – С.201-205.
126. Астахов, М.В. Исследование влияния наночастиц оксидов алюминия на механические свойства полимерных композиционных материалов / М.В. Астахов, И.И. Сорокина // Известия вузов. Машиностроение. – 2011. – №11. – С.56-60.
127. Астахов, М.В. Перспективы применения полимерных композитных материалов с добавлением нанокристаллических порошков оксида алюминия в конструировании и ремонте сельскохозяйственной техники / М.В. Астахов, И.И. Сорокина // Технология металлов. – 2012. – № 12. – С. 18-20.
128. Астахов, М.В. Сравнительный анализ расчета и статических испытаний металло-композитного соединения с дискретными связями / М.В. Астахов, И.И. Сорокина // Известия вузов. Машиностроение. – 2014. – №10(655). – С.10-17.

129. Астахов, М.В. Расчет на прочность металл-композитных соединений с дискретными связями / М.В. Астахов, И.И. Сорокина // Конструкции из композиционных материалов. – 2014. – вып.4(136). – С.8-14.
130. Астахов, М.В. Применение неподвижных металло-композитных соединений при модернизации или ремонте сельскохозяйственной техники / М.В. Астахов, И.И. Сорокина // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2015. - №9. – С.34-39.
131. Вашуков, Ю.А. Технология и оборудование сборочных процессов [Электронный ресурс]: мультимед. пособие / Ю.А. Вашуков, О.В. Ломовской, А.А. Шаров; М-во образования и науки Рос. Федерации, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Самара, 2011. - Режим доступа: http://www.ssau.ru/files/education/uch_posob/Технология%20и%20оборудование%20сборочных%20процессов-Вашуков%20ЮА.pdf свободный (дата обращения 15.01.2016).
132. Стапельные работы в судостроении [Электронный ресурс] // Инженерный клуб, технический журнал. – Режим доступа: <http://www.engineerclub.ru/sudostroenie/shipi18.html> свободный (дата обращения 15.01.2016).
133. Шимкович, Д.Г. Расчет конструкций в MSN/Nastran for Windows / Д.Г. Шимкович – М.: ДМК Пресс, 2003. – 448 с. (Серия «Проектирование»).
134. Жилкин, В.А. Азбука инженерных расчетов в MSC. Patran-Nastran-Marc: Учебное пособие / В.А. Жилкин. - СПб.: Проспект Науки, 2013. - 576 с.
135. Полиновский, В.П. Оптимизация конструкций из композиционных материалов с использованием системы MSC/NASTRAN / В.П. Полиновский – Москва, 1999. – 27с.
136. Китаев, В.М. Моделирование композиционных материалов с использованием систем MSC/NASTRAN и MSC/PATRAN / В.М. Китаев – Москва, 1999. – 63с.
137. Китаев, В.М. Композиционные материалы в MSC/NASTRAN, MSC/PATRAN, MSC/MODELER / В.М. Китаев – Москва, 1999. – 62с.

138. Бахтин, А.Г. Комплексные расчеты головных обтекателей из композиционных материалов / А.Г. Бахтин, В.П. Полиновский // Тр. I-ой Рос. конф. пользователей MSC. – 1999. – С.61-65.
139. Козлов, В.М. Оптимизация процесса транспортирования измельченной массы в роторном кормоуборочном комбайне: автореф. дис. ... к-та тех. наук / В.М. Козлов. – Москва, 2005. – 20 с.
140. Воронин, В.В. Органоминеральные добавки для строительных растворов / В.В. Воронин, И.С. Пуляев // Технологии бетонов. – 2007. – №3(14). – С.20-24.
141. Тимиров, Э.В. Анализ отечественных и зарубежных технологий приготовления асфальтобетонных смесей / Э.В. Тимиров, А.Р. Хурамшин, О.Г. Новоселов // Молодой ученый. – 2015. – №9. – С. 307-309.
142. Мухин, В.М. Новые технологии получения активных углей из реактопластов / В.М. Мухин [и др.] // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2009. – Т. 9. – Вып. 2. – С.191-195.

Список иллюстративного материала

Рисунок 1 – Потребление ПКМ на душу населения.....	8
Рисунок 2 – Модели и схемы образцов соединения «металл-композит»	25
Рисунок 3 – Максимальная нагрузка для болтовых, адгезионных, и комбинированных соединений, $e/d = 1 \dots 4$, Al/S2-стекло	26
Рисунок 4 – Максимальная нагрузка для болтовых и комбинированных соединений Al/S2-стекло и Al/E-стекло, $e/d = 1$ и 4, при вибрационных нагрузках	27
Рисунок 5 – Максимальная нагрузка для болтовых соединений Al/S2-стекло и ВЛС/S2-стекло, $e/d = 1 \dots 4$, при вибрационных нагрузках	28
Рисунок 6 – Максимальная нагрузка для соединений ВЛС/S2-стекло, $e/d = 1$ и 2, с различной подготовкой поверхности при вибрационных нагрузках	29
Рисунок 7 – Максимальная нагрузка для соединений Al/S2-стекло, $e/d = 1$ и 4, $t=24^{\circ}\text{C}$ и 80° , при вибрационных нагрузках.....	30
Рисунок 8 – Нагрузка отказа комбинированного соединения по сравнению с традиционными способами сборки	31
Рисунок 9 – Результаты испытаний на сдвиг соединений внахлестку «сталь-стеклопластик» и «сталь-углепластик» выполненных с заформованной втулкой и с предварительным сверлением отверстия под крепеж	32
Рисунок 10 – Нагрузка отказа комбинированного соединения в зависимости от толщины стеклопластика.....	32
Рисунок 11 – Схема метода ручного (контактного) формования	37
Рисунок 12 - Технология воздушного обволакивания факела (ААС)	39
Рисунок 13 – Образец для тестирования на износостойкость.....	46
Рисунок 14 – Схемы исследования металло-композитного соединения,	52
Рисунок 15 – Основная система метода сил при шести КЭ	56
Рисунок 16 – Упрощенная ОС и эпюры N_{1+5} , N_F	57
Рисунок 17 – Упрощенная ОС и эпюры M_{1+5} , M_F	58
Рисунок 18 – Основная система метода сил при шести КЭ	62

Рисунок 19 – Упрощенная ОС и эпюры N_{1+4} , N_F	63
Рисунок 20 – Упрощенная ОС и эпюры M_{1+4} , M_F	64
Рисунок 21 – Общая схема исследований	70
Рисунок 22 – Образец для проведения эксперимента на растяжение	71
Рисунок 23 – Представители образцов из ПКМ: а) группа 1 – связующее С,	72
Рисунок 24 – Схема проведения лабораторного тестирования.....	82
Рисунок 25 – Схема комбинированного соединения «сталь-ПКМ».....	85
Рисунок 26 – Схема изготовления комбинированного соединения «сталь-ПКМ»	86
Рисунок 27 – Схема изучения соединения «сталь-ПКМ» КЭ с копьеобразной (лопатообразной) законцовкой на разрыв	88
Рисунок 28 – Схема изучения соединения «сталь-ПКМ» на срез.....	92
Рисунок 29 – Типы образцов соединения «сталь-ПКМ»	93
Рисунок 30 – Группы образцов соединения «сталь-композит» (расположение плоскости лопаток КЭ к прикладываемой нагрузке)	97
Рисунок 31 – Приспособление и образец для изучения срезающей силы в соединении «сталь-композит»	100
Рисунок 32 – Диаграмма деформирования модифицированного ПКМ	102
Рисунок 33 – Результаты тестирования по определению предела прочности ПКМ	108
Рисунок 34 – Фотографии порошков наполнителей	109
Рисунок 35 – Изменение микротвердости при наличии наноразмерных модификаторов	118
Рисунок 36 – Эффективность применения нанокристаллических порошков алюминия в различных областях.....	118
Рисунок 37 – Диаграмма нагружения комбинированного соединения «сталь- ПКМ»	122
Рисунок 38 – Вариант конструкции КЭ с утолщенными плечиками	123
Рисунок 39 – Зависимость нормального усилия разрушения соединения от геометрии соединения (ширины лопатки и глубины внедрения КЭ в тело ПКМ)	126

Рисунок 40 – Диаграммы нагружения для образцов представителей:	130
Рисунок 41 – Нагрузка, выдерживаемая образцом в зависимости от расположения КЭ по отношению к сдвигающей силе	135
Рисунок 42 – Образец метало-композитного соединения после разрушения – (а); вид разрушения (срез с вырывом КЭ) – (б)	136
Рисунок 43 – Комплекс зерно- и кормоуборочной техники «Простор»	145
Рисунок 44 – Схема комбайна ПН-420 « Простор»	147
Рисунок 45 – Расчетно-силовая схема конфузора 1	153
Таблица 1 – Технические характеристики порошков наполнителей.....	45
Таблица 2 – Характеристики образцов из ПКМ	73
Таблица 3 – Кодирование факторов	91
Таблица 4 – Критерии согласия Граббса и Романовского	104
Таблица 5 – Опытные данные	104
Таблица 6 – Результаты расчета	106
Таблица 7 – План эксперимента и результаты его обработки.....	110
Таблица 8 – Микротвердость поверхностных фаз.....	115
Таблица 10 – Результаты тестирования соединений «сталь-ПКМ» на вырыв крепежного элемента	121
Таблица 11 – План эксперимента и результаты его обработки.....	124
Таблица 12 – Результаты тестирования соединений «сталь-ПКМ» на срез	129
Таблица 12 – Величины пиковой и максимальной нагрузок.....	133
Таблица 13 – Значения коэффициента K_p	136

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А
(справочное)

Состояние машинотракторного парка (МТП)

Таблица А. 1 – Обеспеченность сельскохозяйственных организаций по Российской Федерации тракторами и комбайнами (на 1 октября)³⁷

Показатели	годы										2013г. в % к 1990г.
	1990	1995	2000	2005	2008 ³⁸	2009	2010	2011	2012	2013	
Приходится тракторов на 1000 га пашни, шт.	11	9	7	6	5	4	4	4	4	4	37,7%
Нагрузка пашни на один трактор, га	95	108	135	181	210	226	236	247	258	274	288,4%
Приходится на 1000 га посевов (посадки) соответствующих культур, шт.: комбайнов											
зерноуборочных	6,6	6	5	4	3	3	3	3	3	3	45,5%
кукурузоуборочных	12,4	15	8	5	1	1	1	1	1	0	0,0%
картофелеуборочных	24,5	56	46	32	23	18	16	16	16	18	73,5%
льноуборочных	21,8	34	32	22	19	18	24	18	16	15	68,8%
Приходится посевов (посадки) соответствующих культур, га: на один комбайн											
зерноуборочный	152	173	198	253	317	344	327	354	369	399	262,5%
кукурузоуборочный	80	68	120	215	846	731	817	1115	1517	2008	2510,0%
картофелеуборочный	41	18	22	31	43	55	62	61	64	57	139,0%
льноуборочный	46	29	31	46	54	56	42	54	64	66	143,5%

³⁷ По данным [3].

³⁸ С 2008 года без учета микропредприятий.

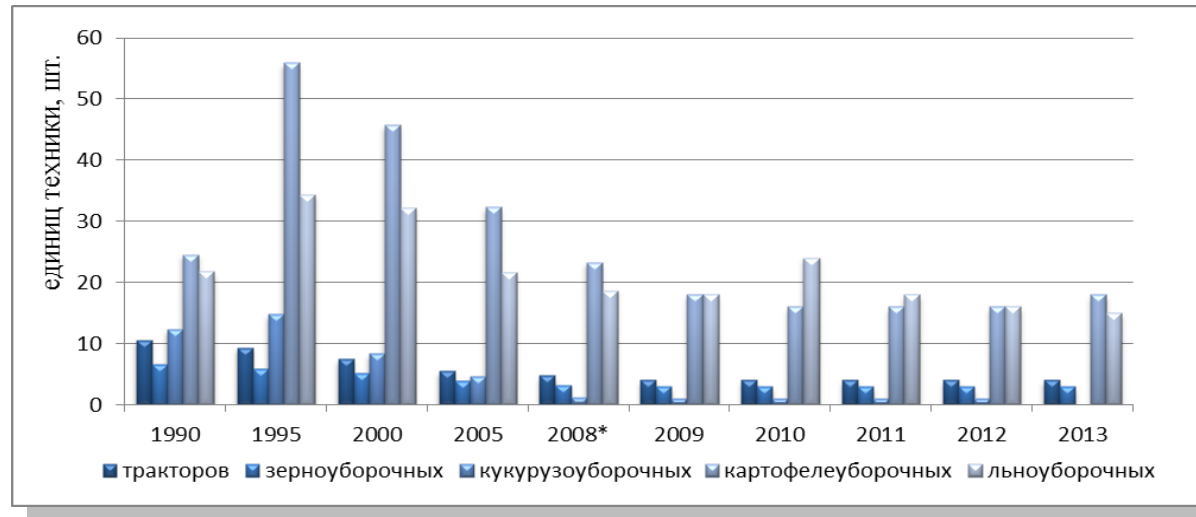


Рисунок А. 1 – Приходится единиц техники в шт. на 1000 Га посевов (посадки) соответствующих культур

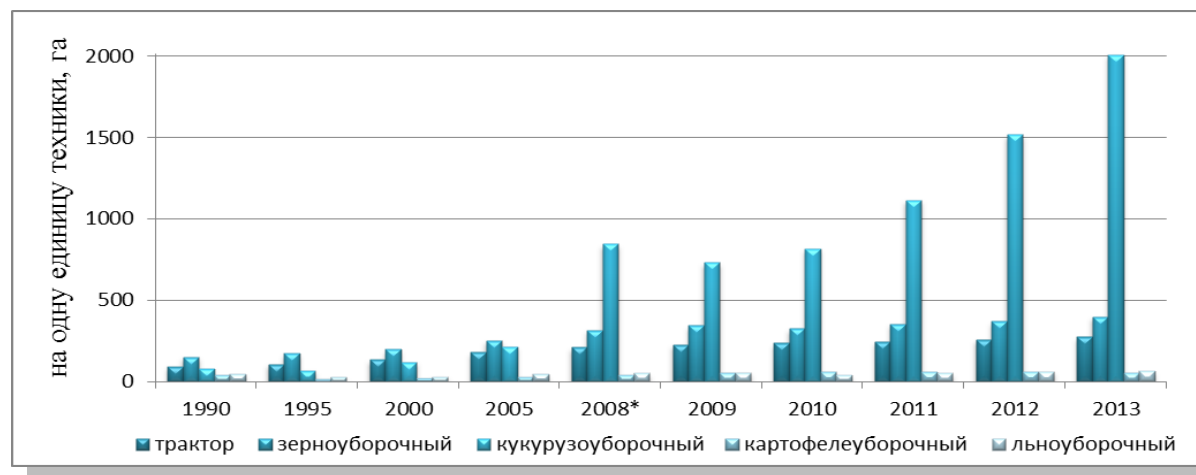
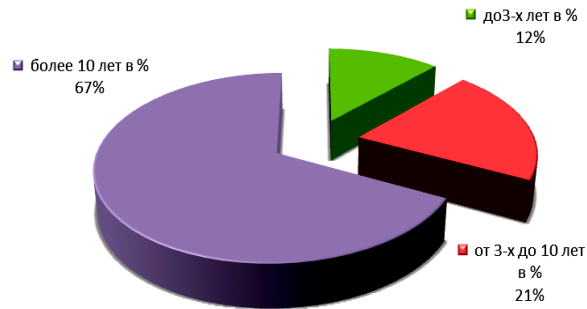


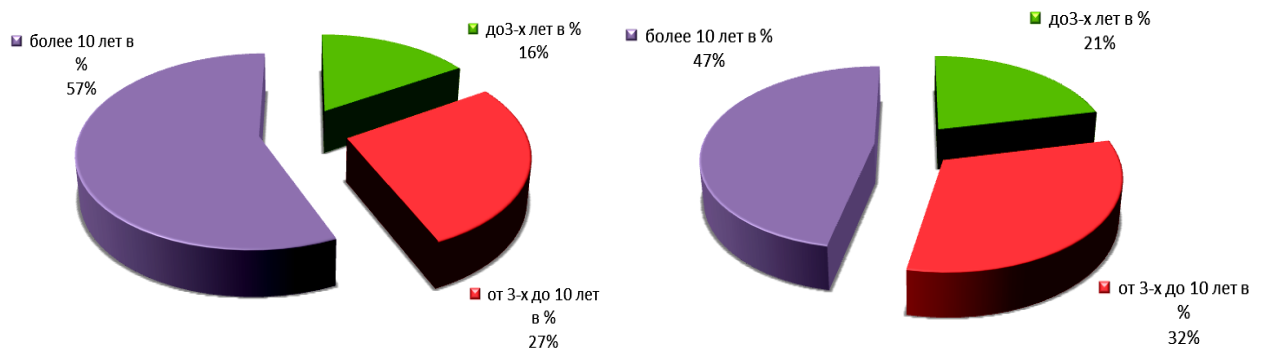
Рисунок А. 2 – Приходится Га посевов (посадки) соответствующих культур на единицу техники

Таблица А. 2 – Структура МТП в 2013г³⁹

Наименование	Всего	до3-х лет в %	от 3-х до 10 лет в %	более 10 лет в %
Тракторы	469555	12,02	20,49	67,49
Зерноуборочные комбайны	125158	16,11	27,28	56,51
Кормоуборочные комбайны	20674	21,56	31,65	46,8



а)



б)

в)

Рисунок А. 3 – Структура парка сельскохозяйственной техники в 2013г.

а) тракторы; б) зерноуборочные комбайны; в) кормоуборочные комбайны

³⁹ По данным [4]

Приложение Б (справочное)

Определение прочностных характеристик модифицированных полимерных композиционных материалов

Оборудование для проведения лабораторного тестирования

Для проведения лабораторного тестирования использовали электромеханическую испытательную машину серии LFM 20 - 100 кН – LFM - 100 (рисунок Б.1), обеспечивающую:

- регистрацию разрушающей нагрузки в диапазоне 0 – 100 кН,
- нагружение со скоростями перемещения захватов 0,01 – 50 мм/мин.,
- максимальное расстояние между захватами – 1450 мм,
- запись диаграммы деформирования.



Рисунок Б. 1 – Общий вид испытательной машины LFM-100

Эта универсальная испытательная машина соответствует ISO 7500-1, класс 0,5, применяется для точных статических испытаний на растяжение,

сжатие или изгиб различных образцов из металлических и композитных материалов.

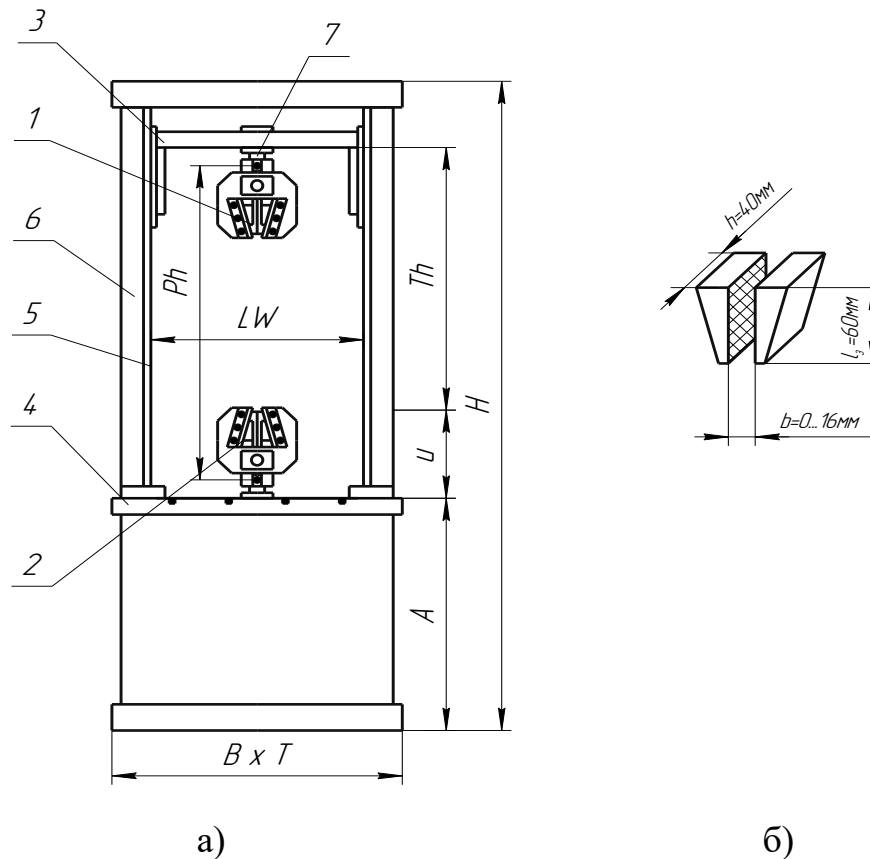


Рисунок Б. 2 – а) Устройство испытательной машины LFM-100, б) конструктивные особенности зажимных губок клиновых захватов

Общее устройство испытательной машины представлено на рисунке Б.2, а. Образец зажимается в верхнем (1) и нижнем (2) захватах. Захваты закрепляются на верхней (3) и нижней (4) траверсах. Верхняя траверса перемещается по направляющим (5) с заданной скоростью. Направление движения верхней траверсы осуществляется колоннами (6). Центрирование нагрузки, прикладываемой к образцу, осуществляется с помощью кардана (7). Измерение прикладываемого усилия производится с помощью датчика силы. Зажим образцов осуществлялся в плоских клиновых захватах, с насечкой зажимных губок (рисунок Б.2, б), практически исключающей проскальзывание и раздавливание закрепляемых концов образца, а также обеспечивающих осесимметричное приложение растягивающей нагрузки к

образцу. Регистрация результатов испытания осуществлялась на ПЭВМ. Конструктивные особенности машины LFM-100 представлены в таблице Б.1.

Таблица Б. 1 – Конструктивные особенности испытательной машины LFM-100

Наименование параметра	Условное обозначение	Единицы измерения	величина
Максимальное усилие	F_{\max}	$кН$	100
Ход траверсы	Th	$мм$	1200
	$и$	$мм$	400
Максимальная скорость	V_{\max}	$мм/мин$	500
Максимальное расстояние между втулками захватов	Ph_{\max}	$мм$	1450
Разрешение	-	$мм$	0,0006
Расстояние между колоннами	LW	$мм$	572
Рабочая высота	A_{\min}	$мм$	750
Ширина	B	$мм$	920
Глубина	T	$мм$	750
Высота	H	$мм$	2500
Вес	G	$кг$	1000
Жесткость рамы нагружения	St	$кН/мм$	140

Таблица Б. 2 – Результаты исследования на растяжение

партия	№ обр.	V $\frac{мм}{мин}$	t сек	b , мм	h , мм	A , $мм^2$	F_{max} , Н	σ_{σ} , МПа
1/1	1	5	37	21,30	1,65	35,145	1898	54
	2	5	37	22,20	1,25	27,750	1998	72
	3	5	37	22,50	1,17	26,325	2053	78
	4	5	37	21,70	1,30	28,210	1721	61
	5	5	37	21,10	1,20	25,320	1443	57
	6	5	37	21,30	1,20	25,560	1891	74
	7	5	37	21,40	1,30	27,820	2059	74
	8	5	37	21,3	1,30	27,690	1774	64
	9	5	37	21,1	1,20	25,320	1923	76
1/2	1	5	37	21,90	1,10	24,090	2819	117
	2	5	37	21,90	1,20	26,280	2286	87
	3	5	37	21,10	1,20	25,320	1671	66
	4	5	37	21,90	1,20	26,280	1682	64
	5	5	37	21,40	1,20	25,680	1823	71
	6	5	37	21,30	1,20	25,560	2019	79
	7	5	37	21,30	1,20	25,560	1406	55
	8	5	37	21,1	1,2	25,320	1878	74
2/1	1	5	35	20,30	2,00	40,600	1665	41
	2	5	35	20,20	1,60	32,320	1422	44
	3	5	35	20,60	2,00	41,200	1566	38
	4	5	35	20,20	1,85	37,370	1405	38
	5	5	35	20,30	1,95	39,585	1719	43
	6	5	35	20,40	2,00	40,800	1477	36
	7	5	35	20,30	2,00	40,600	1678	41
2/2	1	5	35	19,30	2,25	43,425	2215	51
	2	5	35	19,70	2,25	44,325	2128	48
	3	5	35	19,30	2,30	44,390	1642	37
	4	5	35	19,70	2,20	43,340	2210	51
	5	5	35	19,30	2,20	42,460	2083	49
	6	5	35	19,30	2,25	43,425	2136	49
	7	5	35	19,70	2,30	45,310	2205	49
	8	5	37	19,70	2,25	44,325	2305	52

Продолжение таблицы Б. 2

партия	№ обр.	V $\frac{мм}{мин}$	t $сек$	$b,$ $мм$	$h,$ $мм$	$A,$ $мм^2$	$F_{max},$ H	$\sigma_{\epsilon},$ $МПа$
3/4	1	5	35	19,70	1,20	23,640	1395	59
	2	5	35	19,80	1,37	27,126	1709	63
	3	5	35	19,80	1,20	23,760	1568	66
	4	5	35	19,70	1,35	26,595	1600	60
	5	5	35	19,80	1,37	27,126	1843	68
	6	5	35	19,70	1,28	25,216	1597	63
	7	5	35	19,70	1,39	27,383	1205	44

Таблица Б. 3 – Цензурирование выборок на основании критериев Граббса и Романовского

партия	$y_i = \sigma_{\epsilon},$ $МПа$	\bar{y}	S^2	S	S_y	$\tau_{a,n}$	$\tau'_{a,n}$
1/1	57	69,40	42,48	6,52	2,91	1,90	2,13
	61					1,29	1,44
	64					0,82	0,92
	72					0,40	0,45
	74					0,71	0,79
	76					1,00	1,12
	78					1,32	1,48
1/2	55	70,83	36,96	6,08	2,72	2,60	2,91
	64					0,19	0,22
	66					0,52	0,58
	71					0,84	0,94
	74					1,18	1,32
	79					1,34	1,50
	87					2,66	2,97
2/1	36	40,27	5,97	2,44	1,09	1,67	1,86
	38					1,09	1,22
	38					0,93	1,04
	41					0,30	0,33
	41					0,43	0,48
	43					1,29	1,45
	44					1,53	1,71

Продолжение таблицы Б.3

партия	$y_i = \sigma_{\sigma},$ МПа	\bar{y}	S^2	S	S_y	$\tau_{a,n}$	$\tau'_{a,n}$
2/2	48	49,78	1,28	1,13	0,51	1,57	1,76
	49					0,46	0,51
	49					0,30	0,34
	49					0,25	0,27
	51					0,50	0,56
	51					0,50	0,56
	52					0,91	1,02
2/3	43	46,12	3,15	1,77	0,79	1,76	1,97
	44					1,20	1,34
	45					0,50	0,56
	46					0,22	0,24
	47					0,48	0,53
	49					1,44	1,61
	50					2,19	2,45
2/4	52	62,65	12,01	3,47	1,55	3,07	3,43
	58					1,41	1,58
	61					0,48	0,53
	64					0,27	0,30
	64					0,36	0,40
	67					1,25	1,40
	70					2,12	2,38
3/1	43	45,44	0,92	0,96	0,43	2,54	2,84
	44					1,50	1,68
	45					0,46	0,51
	46					0,23	0,25
	46					0,81	0,91
	46					0,91	1,02
	47					1,70	1,90
3/2	44	47,05	1,49	1,22	0,55	2,50	2,80
	45					1,64	1,83
	47					0,04	0,05
	47					0,04	0,04
	48					0,78	0,87
	48					0,85	0,94
	49					1,91	2,13

Продолжение таблицы Б.3

партия	$y_i = \sigma_{\sigma},$ МПа	\bar{y}	S^2	S	$S_{\bar{y}}$	$\tau_{a,n}$	$\tau'_{a,n}$
3/3	47					1,67	1,87
	48	50,75	5,09	2,26	1,01	1,07	1,19
	49					0,60	0,67
	50					0,33	0,37
	52					0,56	0,62
	54					1,44	1,61
	55					1,88	2,10
3/4	59					1,71	1,91
	60	64,10	8,91	2,98	1,33	1,32	1,47
	63					0,37	0,41
	63					0,25	0,28
	66					0,64	0,71
	68					1,29	1,44
	74					3,32	3,71
Примечание: - результат, отброшенный как промах при проверке по заданным критериям.							

Таблица Б. 4 – Цензурирование выборок при помощи доверительного интервала

партия	$y_i = \sigma_{\epsilon},$ МПа	\bar{y}	S^2	S	$S_{\bar{y}}$	$\Delta_{a,n}$	$\bar{y} + \Delta_{a,n}$	$\bar{y} - \Delta_{a,n}$
1/1	57	69,40	42,48	6,52	2,91	8,10	77,50	61,30
	61							
	64							
	72							
	74							
	76							
	78							
2/1	36	40,27	5,97	2,44	1,09	3,04	43,31	37,23
	38							
	38							
	41							
	41							
	43							
	44							
2/2	48	49,78	1,28	1,13	0,51	1,40	51,18	48,37
	49							
	49							
	49							
	51							
	51							
	52							
Примечание:			- результат, отброшенный как промах при проверке доверительным интервалом.					

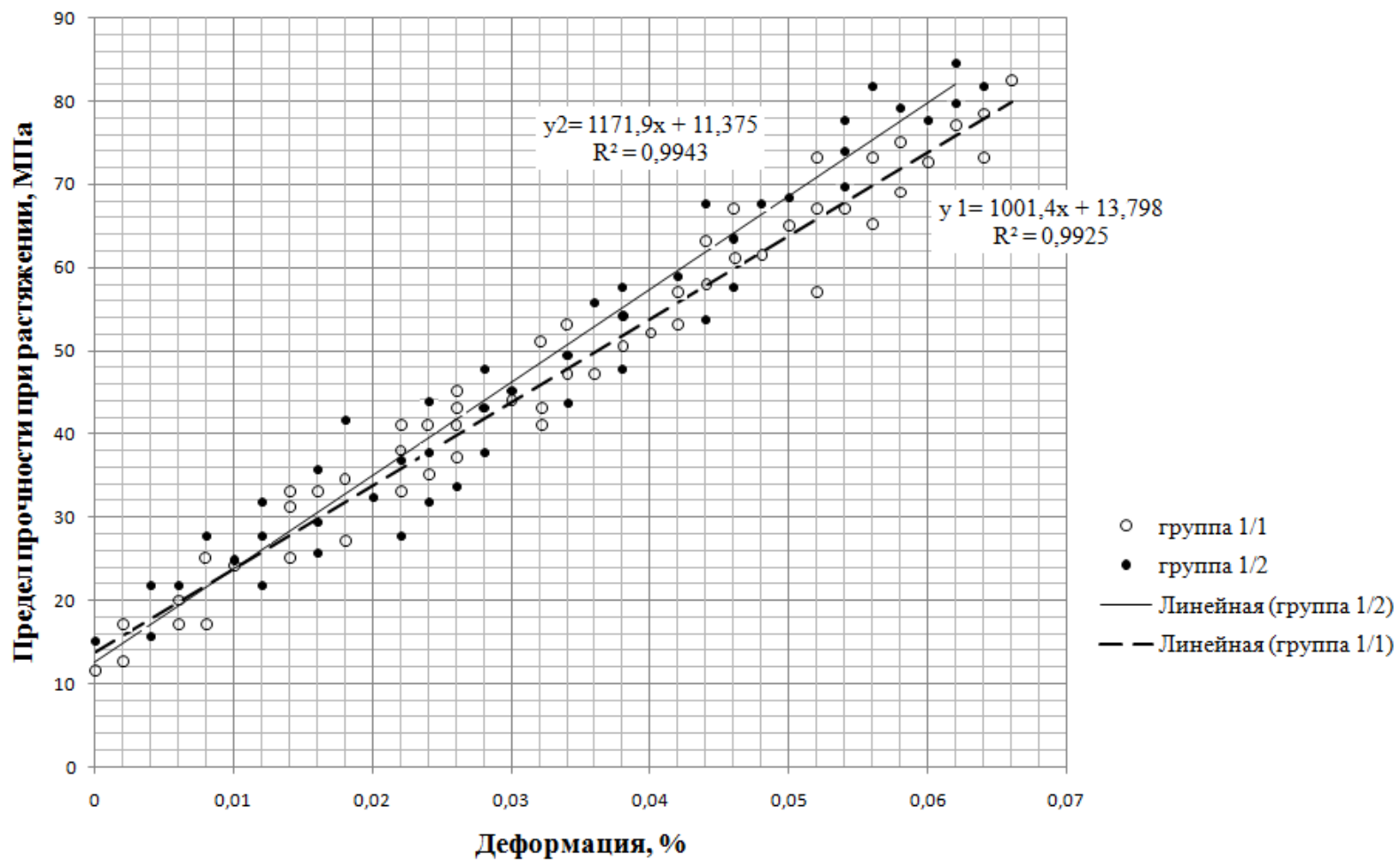


Рисунок Б. 3а – Аппроксимация результатов эксперимента для образцов без ультрадисперсных порошков (1 группа)

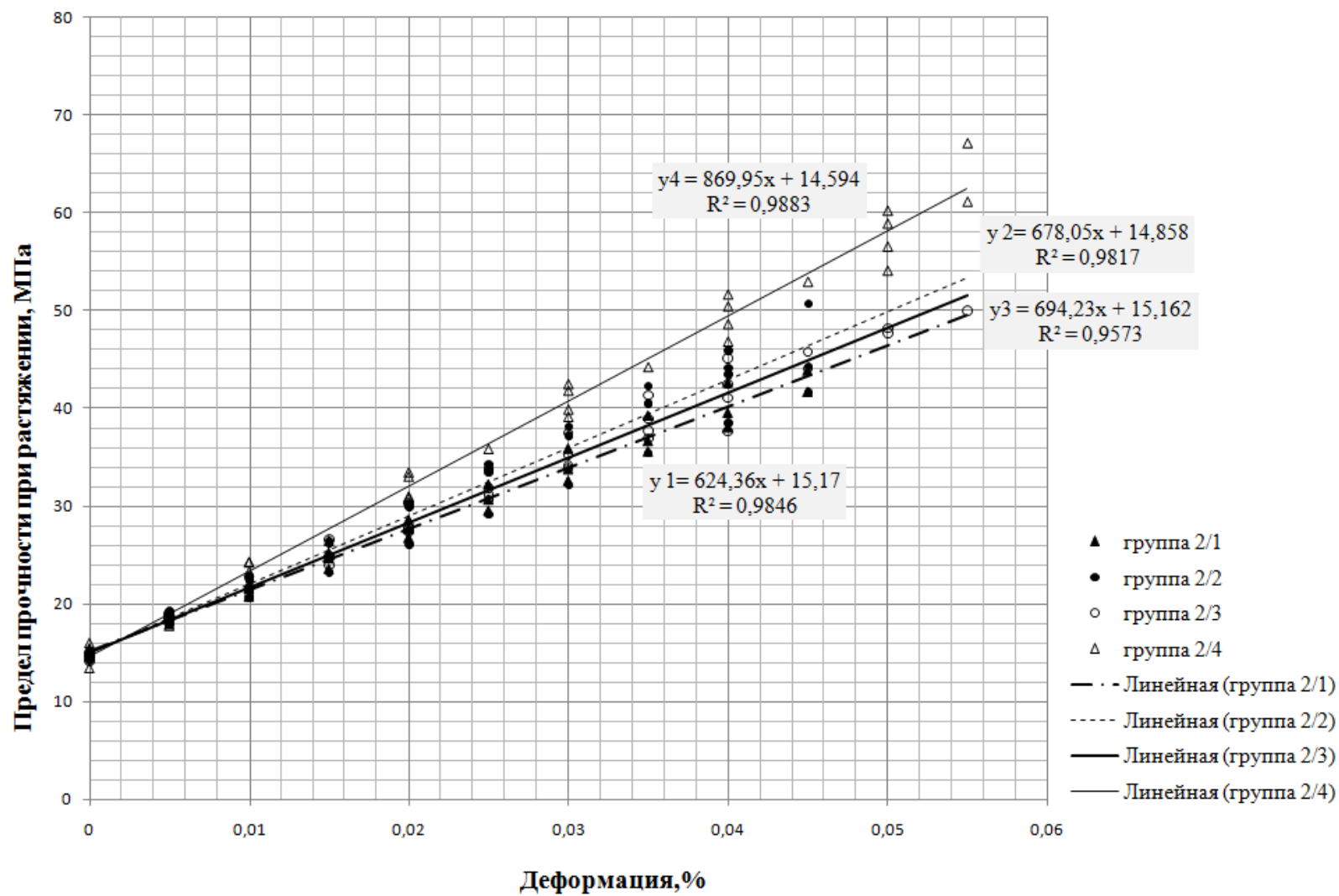


Рисунок Б. 36 – Аппроксимация результатов эксперимента для образцов с Al(OОН) (2 группа)

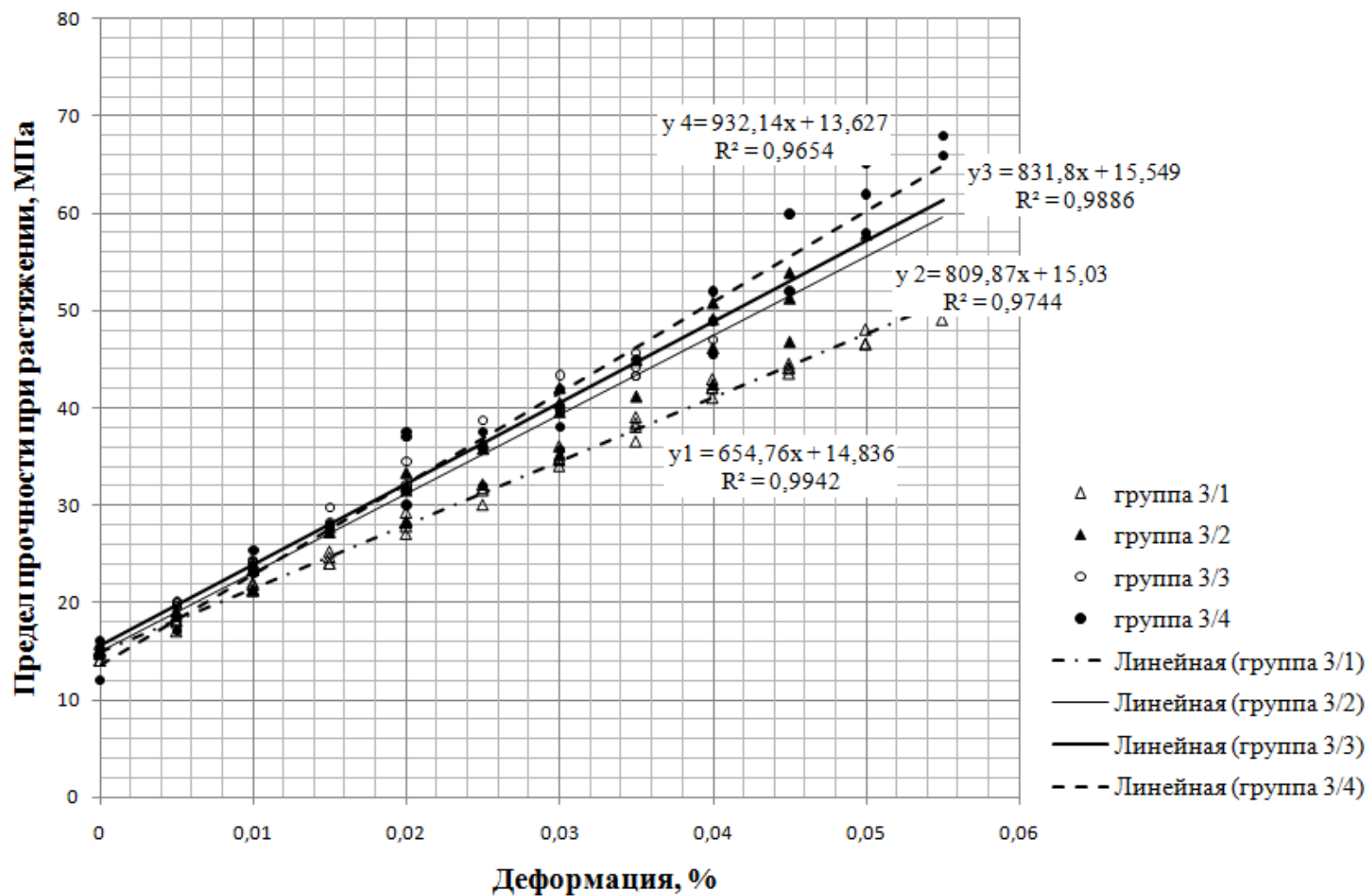


Рисунок Б. 3в – Аппроксимация результатов эксперимента для образцов с Al_2O_3 (3 группа)

Базовой в программе Minitab 17 является гипотеза, что рассматриваемый закон распределения случайной величины не подходит, т.е. чем выше уровень значимости, тем лучше предложенный закон описывает полученные экспериментальные данные.

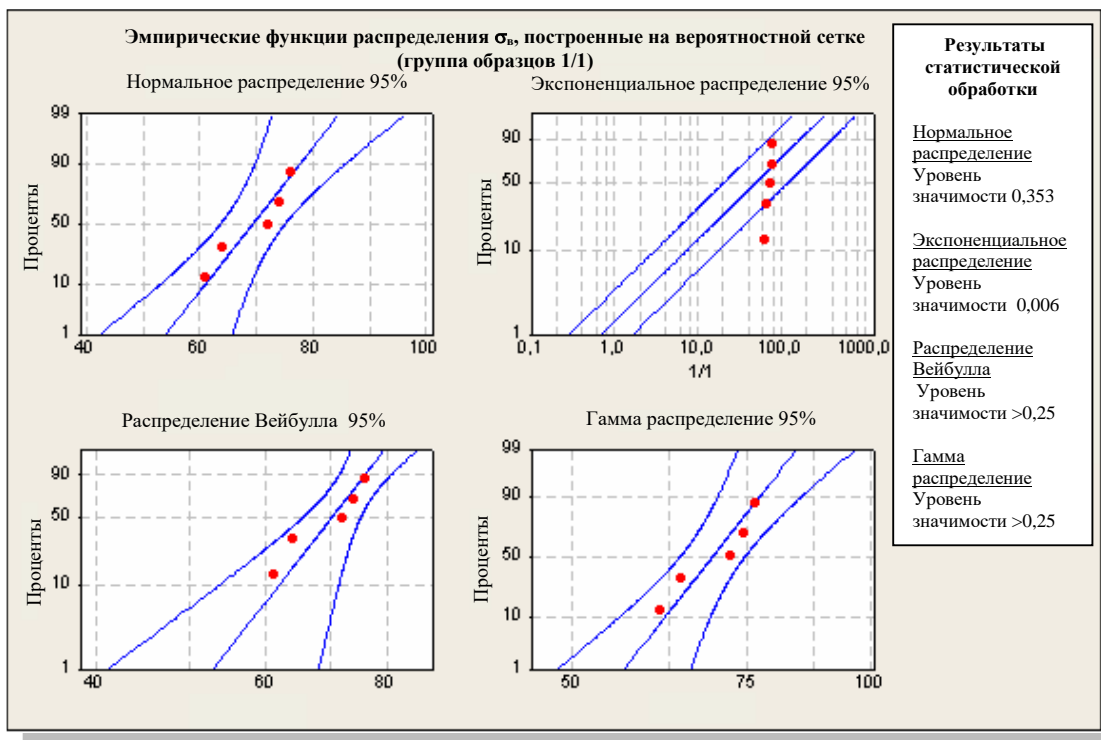


Рисунок Б. 4 – Выбор функции распределения σ_v на примере группы образцов 1/1

Таблица Б. 5 – Значения экспериментально определенного модуля упругости при растяжении модифицированных ПКМ

в МПа

группа	подгруппа			
	1	2	3	4
1	1172	1001	-	-
2	625	678	695	870
3	655	810	832	932

Однофакторный дисперсионный анализ (предела прочности на разрыв модифицированных ПКМ)

Условные обозначения дисперсионного анализа в программе:

- DF – статистическое число степеней свободы
(для группы $f_1 = k - 1$, между группами $f_2 = f - k$);
- SS – сумма СКО;
- MS – математическое ожидание СКО;
- Adj SS – скорректированная сумма СКО;
- Adj MS – скорректированное математическое ожидание СКО;
- F-Value – статистика критерия Фишера;
- P-Value – вероятность ошибки (значимость),
любое **значение P, меньше 0,05** говорит о выполнении нулевой гипотезы;

Однофакторный дисперсионный анализ для групп: 1/1; 2/1; 3/1

Нулевая гипотеза Все средние однородны
 Альтернативная гипотеза Существует хотя бы одно отличающееся среднее
 Уровень значимости $\alpha = 0,05$

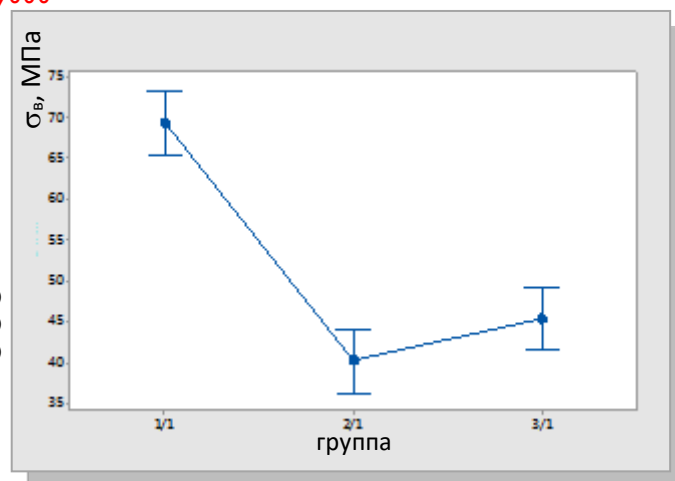
Фактор	Уровень	Значение
Фактор	3	1/1; 2/1; 3/1

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Фактор	2	2426,1	1213,07	75,35	0,000
Ошибка	12	193,2	16,10		
Всего	14	2619,3			

Значения

Фактор	N	Среднее	Ст. Откл.	95% CI
1/1	5	69,40	6,54	(65,49; 73,31)
2/1	5	40,200	2,168	(36,290; 44,110)
3/1	5	45,400	0,894	(41,490; 49,310)



Однофакторный дисперсионный анализ для групп: 2/1; 3/1

Нулевая гипотеза Все средние однородны
 Альтернативная гипотеза Существует хотя бы одно отличающееся среднее
 Уровень значимости $\alpha = 0,05$

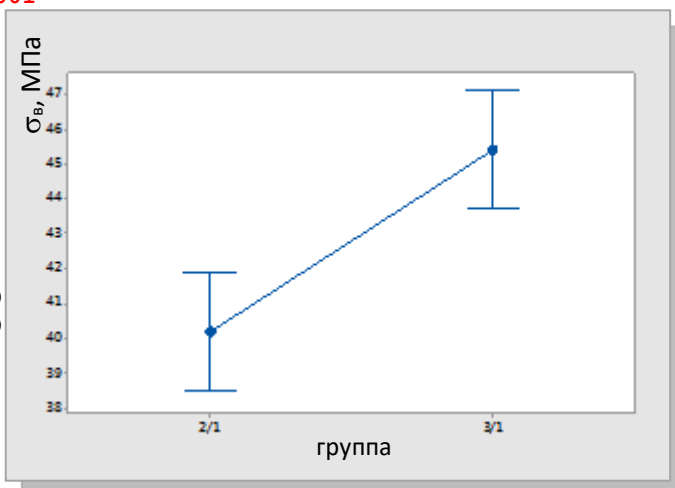
Фактор	Уровень	Значение
Фактор	2	2/1; 3/1

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Фактор	1	67,60	67,600	24,58	0,001
Ошибка	8	22,00	2,750		
Всего	9	89,60			

Значения

Фактор	N	Среднее	Ст. Откл.	95% CI
2/1	5	40,200	2,168	(38,490; 41,910)
3/1	5	45,400	0,894	(43,690; 47,110)



Однофакторный дисперсионный анализ для групп: 1/1; 2/2; 3/2

Нулевая гипотеза Все средние однородны
Альтернативная гипотеза Существует хотя бы одно отличающееся среднее
Уровень значимости $\alpha = 0,05$

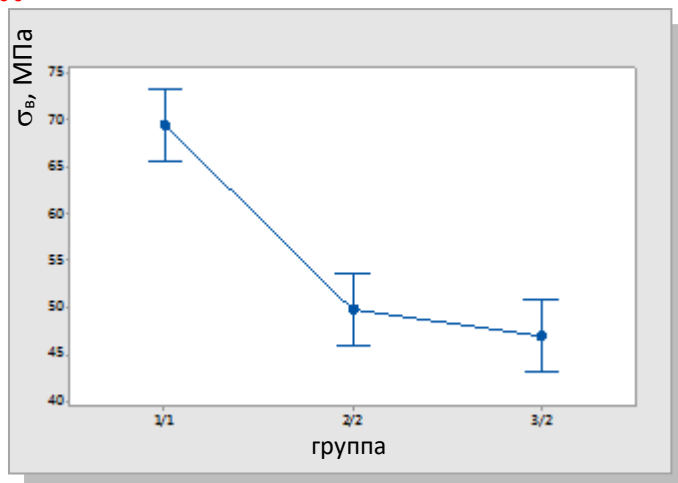
Фактор	Уровень	Значение
Фактор	3	1/1; 2/2; 3/2

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Фактор	2	1489,6	744,80	49,11	0,000
Ошибка	12	182,0	15,17		
Всего	14	1671,6			

Значения

Фактор	N	Среднее	Ст. Откл.	95% CI
1/1	5	69,40	6,54	(65,61; 73,19)
2/2	5	49,800	1,095	(46,005; 53,595)
3/2	5	47,000	1,225	(43,205; 50,795)



Однофакторный дисперсионный анализ для групп: 2/2; 3/2

Нулевая гипотеза Все средние однородны
Альтернативная гипотеза Существует хотя бы одно отличающееся среднее
Уровень значимости $\alpha = 0,05$

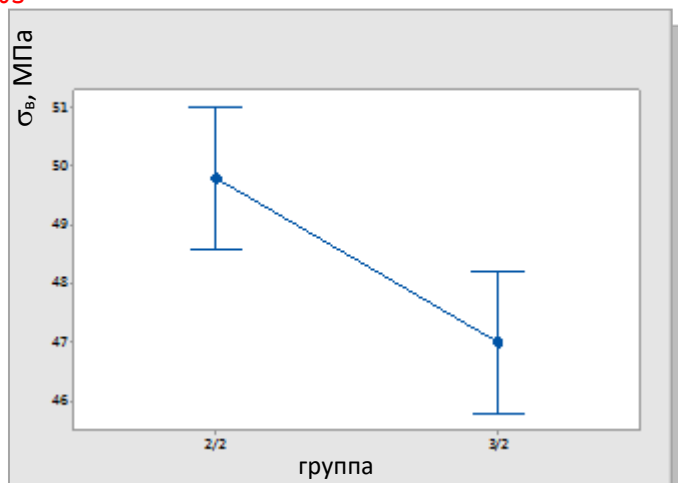
Фактор	Уровень	Значение
Фактор	2	2/2; 3/2

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Фактор	1	19,60	19,600	14,52	0,005
Ошибка	8	10,80	1,350		
Всего	9	30,40			

Значения

Фактор	N	Среднее	Ст. Откл.	95% CI
2/2	5	49,800	1,095	(48,602; 50,998)
3/2	5	47,000	1,225	(45,802; 48,198)



Однофакторный дисперсионный анализ для групп: 1/2; 2/3; 3/3

Нулевая гипотеза Все средние однородны
 Альтернативная гипотеза Существует хотя бы одно отличающееся среднее
 Уровень значимости $\alpha = 0,05$

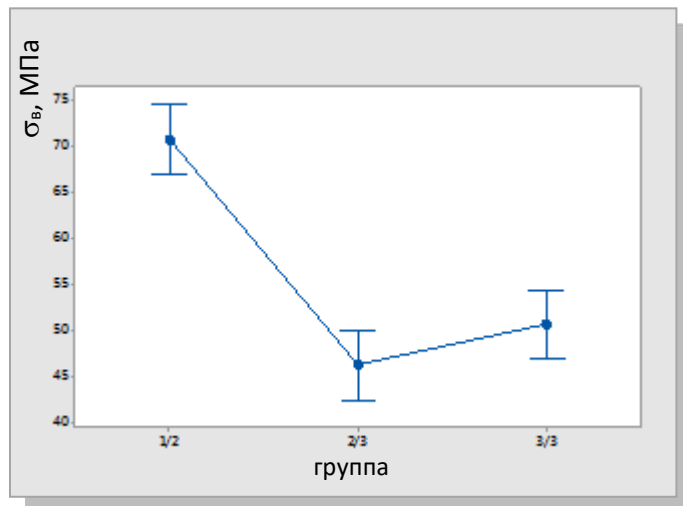
Фактор	Уровень	Значение
Фактор	3	1/2; 2/3; 3/3

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Фактор	2	1720,9	860,47	55,87	0,000
Ошибка	12	184,8	15,40		
Всего	14	1905,7			

Значения

Фактор	N	Среднее	Ст. Откл.	95% CI
1/2	5	70,80	6,06	(66,98; 74,62)
2/3	5	46,200	1,924	(42,376; 50,024)
3/3	5	50,60	2,41	(46,78; 54,42)



Однофакторный дисперсионный анализ для групп: 2/3; 3/3

Нулевая гипотеза Все средние однородны
 Альтернативная гипотеза Существует хотя бы одно отличающееся среднее
 Уровень значимости $\alpha = 0,05$

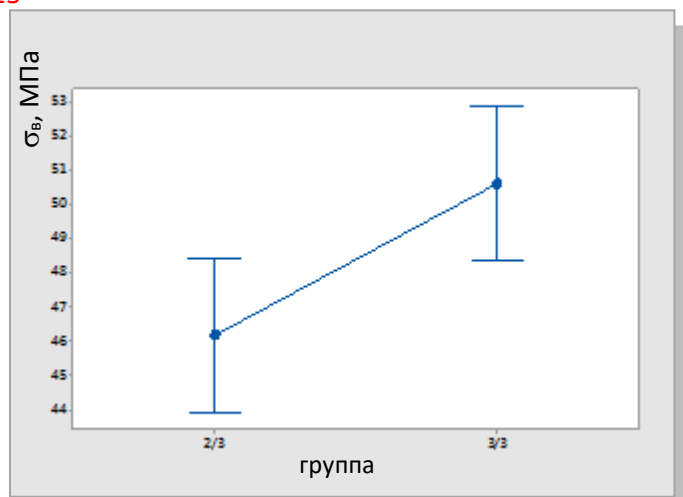
Фактор	Уровень	Значение
Фактор	2	2/3; 3/3

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Фактор	1	48,40	48,400	10,19	0,013
Ошибка	8	38,00	4,750		
Всего	9	86,40			

Значения

Фактор	N	Среднее	Ст. Откл.	95% CI
2/3	5	46,200	1,924	(43,952; 48,448)
3/3	5	50,60	2,41	(48,35; 52,85)



Однофакторный дисперсионный анализ для групп: 1/2; 2/4; 3/4

Нулевая гипотеза Все средние однородны
 Альтернативная гипотеза Существует хотя бы одно отличающееся среднее
 Уровень значимости $\alpha = 0,05$

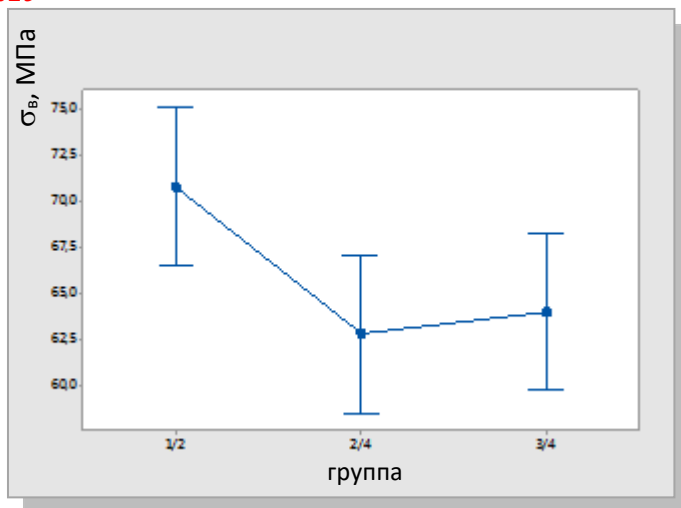
Фактор **Уровень** **Значение**
 Фактор 3 1/2; 2/4; 3/4

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Фактор	2	186,1	93,07	4,82	0,029
Ошибка	12	231,6	19,30		
Всего	14	417,7			

Значения

Фактор	N	Среднее	Ст. Откл.	95% CI
1/2	5	70,80	6,06	(66,52; 75,08)
2/4	5	62,80	3,42	(58,52; 67,08)
3/4	5	64,00	3,08	(59,72; 68,28)



Однофакторный дисперсионный анализ для групп: 2/4; 3/4

Нулевая гипотеза Все средние однородны
 Альтернативная гипотеза Существует хотя бы одно отличающееся среднее
 Уровень значимости $\alpha = 0,05$

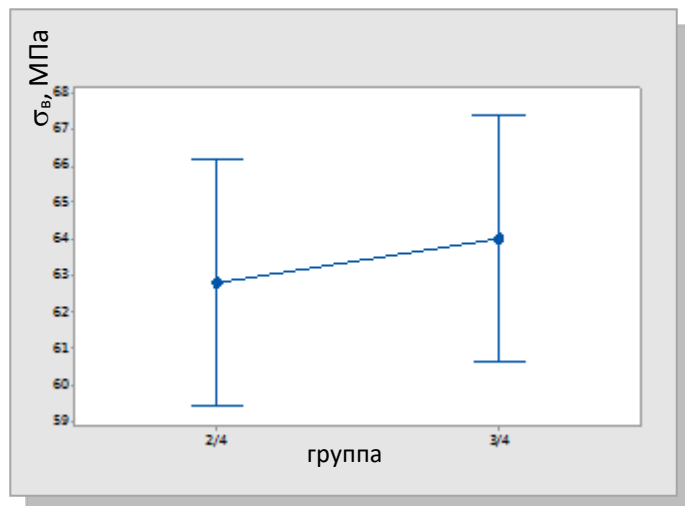
Фактор **Уровень** **Значение**
 Фактор 2 2/4; 3/4

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Фактор	1	3,600	3,600	0,34	0,576!!!
Ошибка	8	84,800	10,600		
Всего	9	88,400			

Значения

Фактор	N	Среднее	Ст. Откл.	95% CI
2/4	5	62,80	3,42	(59,44; 66,16)
3/4	5	64,	3,08	(60,64; 67,36)



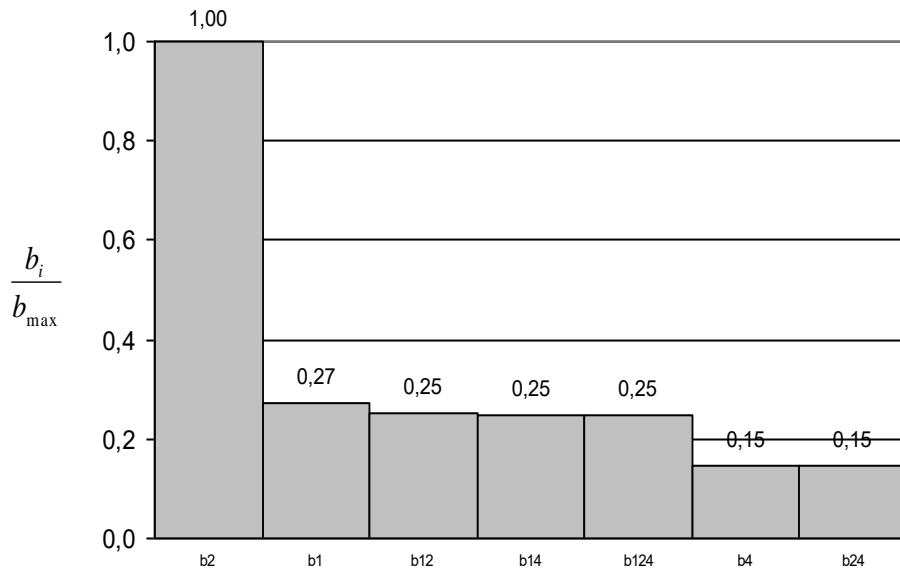


Рисунок Б. 5 – Ранжирование эффектов факторов по критерию Стьюдента, регрессивный анализ

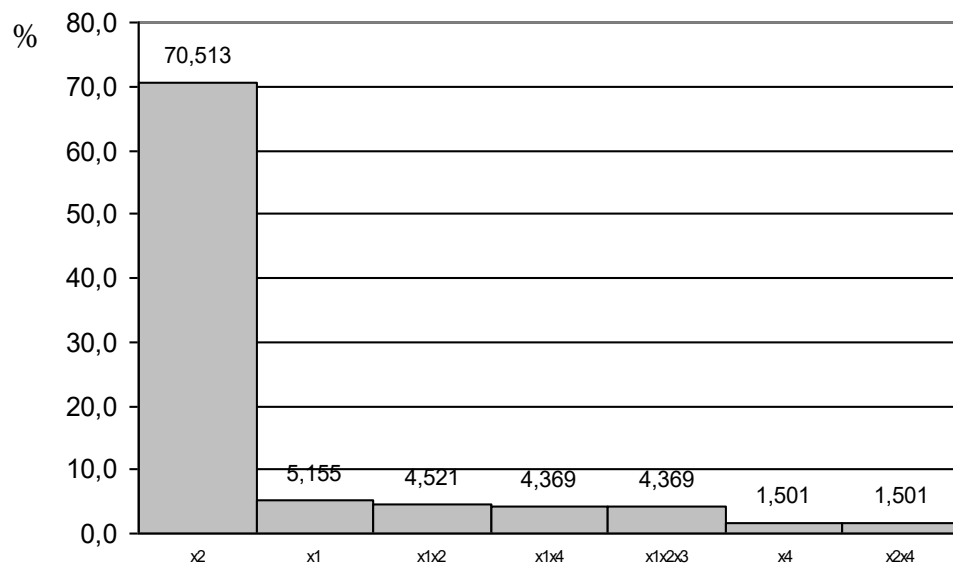


Рисунок Б. 6 – Ранжирование эффектов факторов по критерию Фишера, дисперсионный анализ

Приложение В (справочное)

Определение микротвердости поверхностных фаз модифицированных полимерных композиционных материалов

Оборудование для проведения лабораторного тестирования

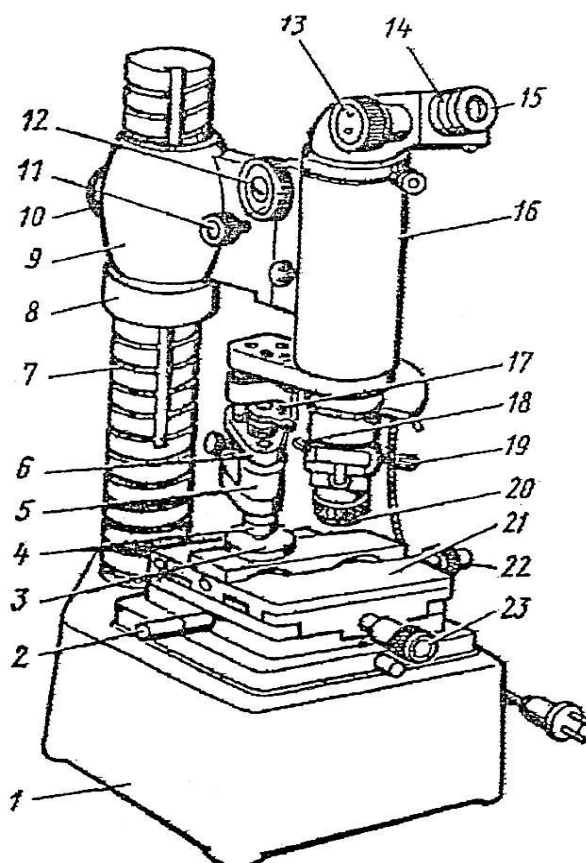


Рисунок В. 1 – Прибор ПМТ-3

Основание (1) прибора имеет стойку (7), по которой гайкой (8) при ослабленном винте (10) можно перемещать кронштейн (9) с тубусом (16) микроскопа. Кронштейн (9) имеет направляющие, по которым можно перемещать тубус (16). Грубое перемещение тубуса (16) осуществляется вращением винта (12) (макроподача), а малое перемещение – вращением винта (11) (микроподача). Тубус имеет наклонную трубку с окуляром (15) и объектив (20). К тубусу прикреплен механизм нагружения (6) с алмазным

наконечником (4), представляющим собой четырехгранную алмазную пирамиду с углом при вершине 136° . На основании (1) расположен предметный столик (21), верхнюю часть которого при помощи винтов (22, 23) можно перемещать в двух взаимно перпендикулярных направлениях (координатное перемещение) и рукояткой (2) поворачивать вокруг оси приблизительно на 180° от одного упора до другого (полукруговое перемещение). На столик (21) устанавливают образец (3). Центрирование прибора осуществляется винтами (18, 19).

Результаты

Таблица В. 1 – Микротвердость образцов

в кГ/мм²

партия	№ обр.	H_{200}			
		1	2	3	Среднее
1/1	3	19,20	17,60	16,70	17,83
«	7	17,40	21,00	20,10	19,50
1/2	1	18,90	17,60	16,70	17,73
«	6	19,80	19,50	18,90	19,40
1	доп.	21,90	21,40	27,60	23,63
2/1	2	19,50	42,00	21,30	27,60
2/2	2	22,30	24,50	23,40	23,40
2/3	3	25,80	18,90	25,30	23,33
2/4	2	19,80	21,30	18,90	20,00
2	доп.	18,90	21,40	25,10	21,80
3/1	-	-	-	-	-
3/2	4	30,10	30,10	35,70	31,97
3/3	-	-	-	-	-
3/4	3	29,00	31,20	29,60	29,93
3	доп.	29,00	23,40	26,90	26,43

Обработка результатов

Исключение промахов проводилось при помощи контрольных карт, которые показывают, действительно ли изучаемый процесс является случайным, или присутствуют внешние факторы, влияющие на результат. На контрольной карте промахи изображаются красным цветом.

На примере образцов 2 группы приведена контрольная карта собственных значений (рисунок В.2). После отбрасывания промахов проводилась проверка на однородность полученной выборки, повторным применением контрольной карты (рисунок В.3).

Условные обозначения на контрольной карте в программе:

UCL, LCL – верхняя и нижняя контрольные границы, интервал 3 сигма;

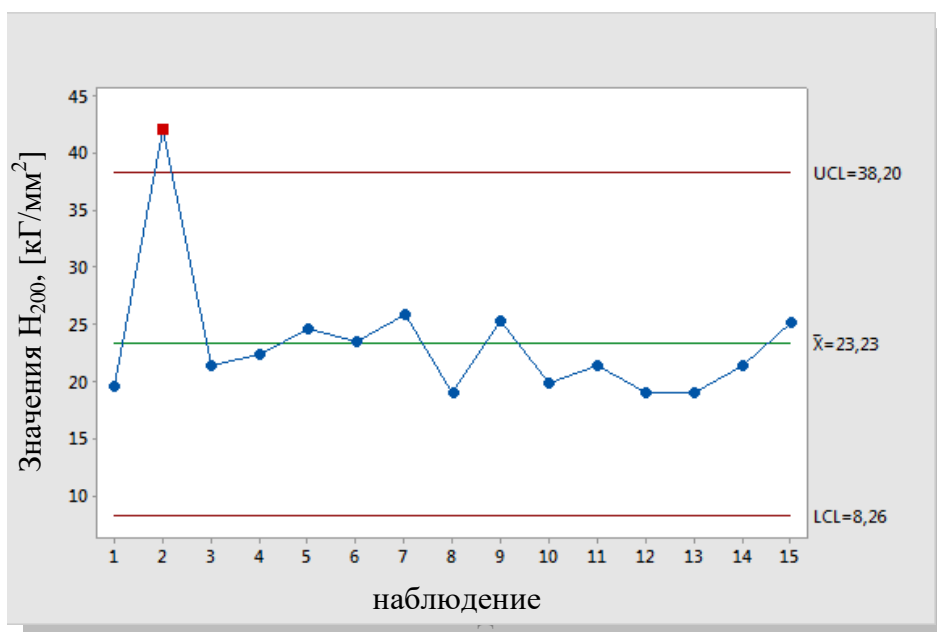


Рисунок В. 2 – Отсеивание промахов для 2 группы образцов

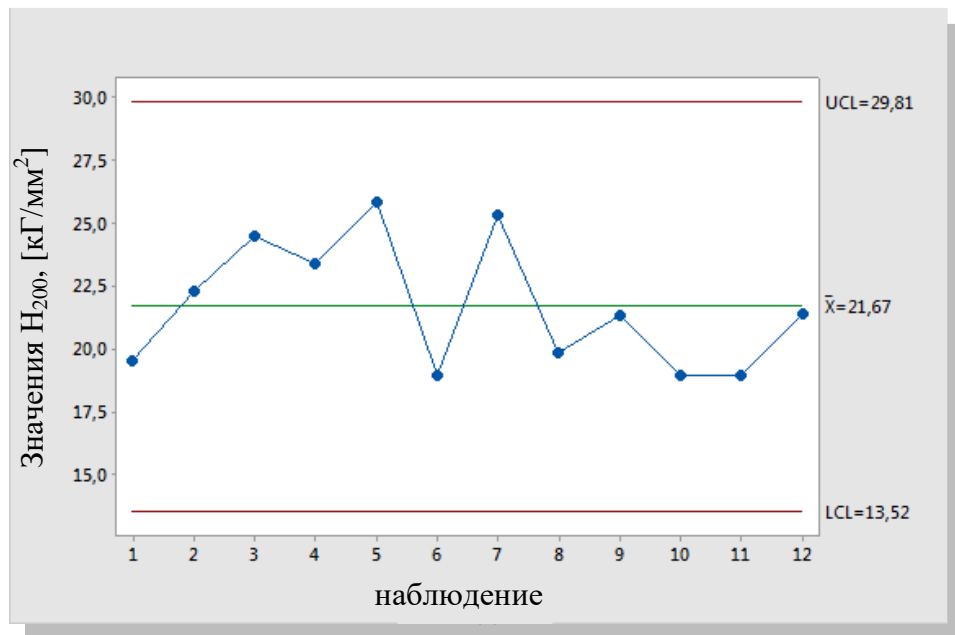


Рисунок В. 3 – Окончательная выборка для 2 группы образцов

Таблица В. 2 – Цензурирование выборок H_{200} при помощи контрольных карт собственных значенийв кг/мм²

партия								
1			2			3		
H_{200}	\bar{y}	S^2	H_{200}	\bar{y}	S^2	H_{200}	\bar{y}	S^2
16,70	19,05	2,87	18,90	21,667	6,64	23,40	29,44	10,8
17,40			18,90			26,90		
17,60			18,90			29,00		
18,90			19,80			29,00		
18,90			21,30			29,60		
19,50			21,40			31,20		
19,80			22,30					
20,10			23,40					
21,00			24,50					
21,40			25,10					
21,90			25,30					
27,60			25,80					
Примечание:			- результат, отмеченный как промах на контрольной карте.					

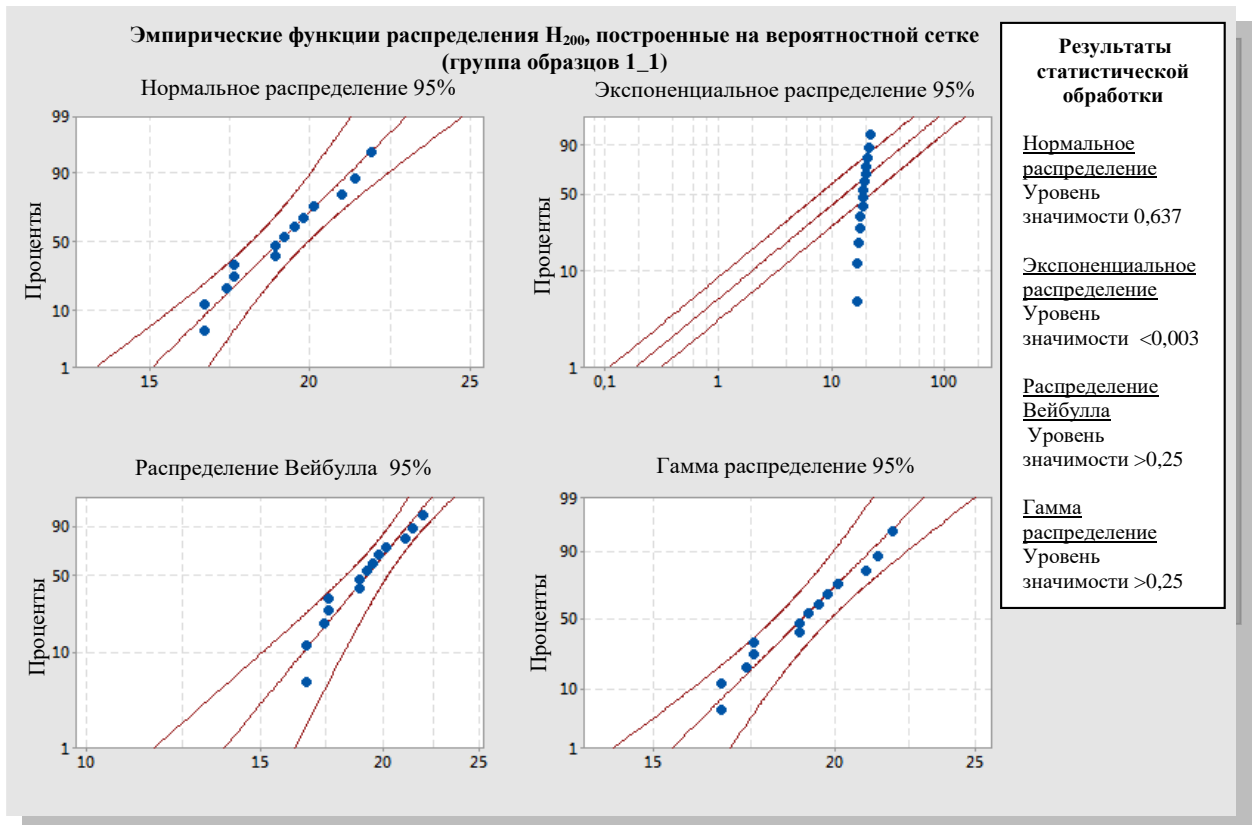


Рисунок В. 4 – Выбор функции распределения N_{200} на примере группы образцов 1_1 (цензурированная выборка для группы 1)

Однофакторный дисперсионный анализ (микротвердость)

Однофакторный Дисперсионный анализ для групп: 1_1; 2_1; 3_1

Нулевая гипотеза Все средние однородны
Альтернативная гипотеза Существует хотя бы одно отличающееся среднее
Уровень значимости $\alpha = 0,05$

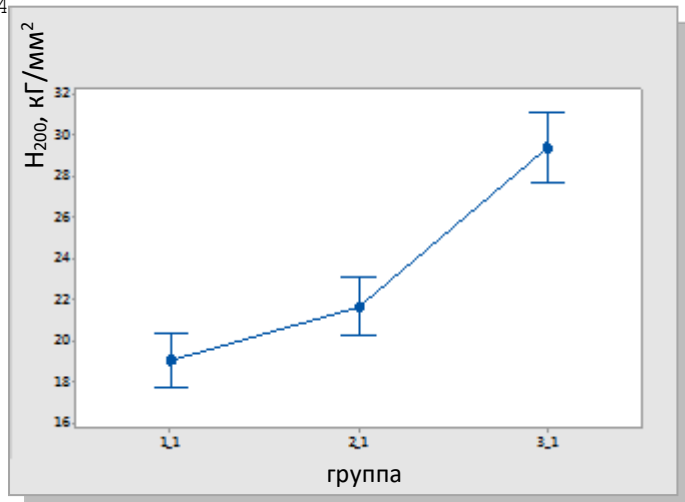
Фактор **Уровень** **Значение**
Фактор 3 1_1; 2_1; 3_1

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Seq SS	Вклад	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Фактор	2	608,5	75,55%	608,5	304,246	49,44	0,000
Ошибка	32	196,9	24,45%	196,9	6,154		
Всего	34	805,4	100,00%				

Значения

Фактор	N	Среднее	Ст. Откл.	95% CI
1_1	14	19,050	1,695	(17,700; 20,400)
2_1	12	21,667	2,577	(20,208; 23,125)
3_1	9	29,44	3,29	(27,76; 31,13)



Однофакторный дисперсионный анализ для групп: 1_1; 2_1

Нулевая гипотеза Все средние однородны
Альтернативная гипотеза Существует хотя бы одно отличающееся среднее
Уровень значимости $\alpha = 0,05$

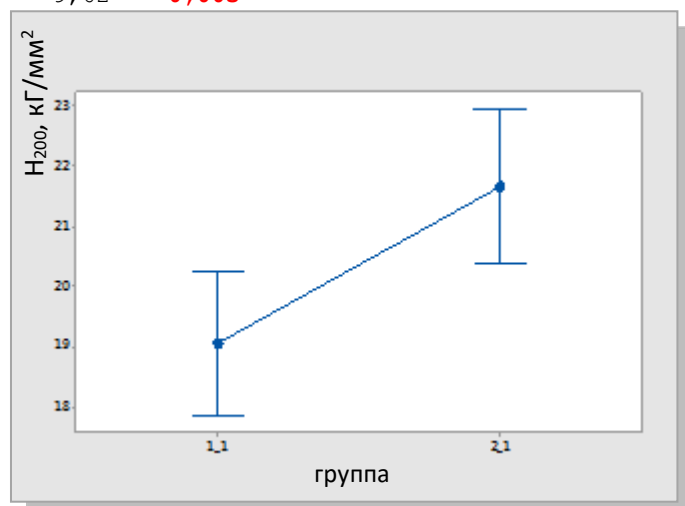
Фактор **Уровень** **Значение**
Фактор 2 1_1; 2_1

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Seq SS	Вклад	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Фактор	1	44,24	28,61%	44,24	44,242	9,62	0,005
Ошибка	24	110,42	71,39%	110,42	4,601		
Всего	25	154,66	100,00%				

Значения

Фактор	N	Среднее	Ст. Откл.	95% CI
1_1	14	19,050	1,695	(17,867; 20,233)
2_1	12	21,667	2,577	(20,389; 22,945)



Однофакторный дисперсионный анализ для групп: 1_1; 3_1

Нулевая гипотеза Все средние однородны
 Альтернативная гипотеза Существует хотя бы одно отличающееся среднее
 Уровень значимости $\alpha = 0,05$

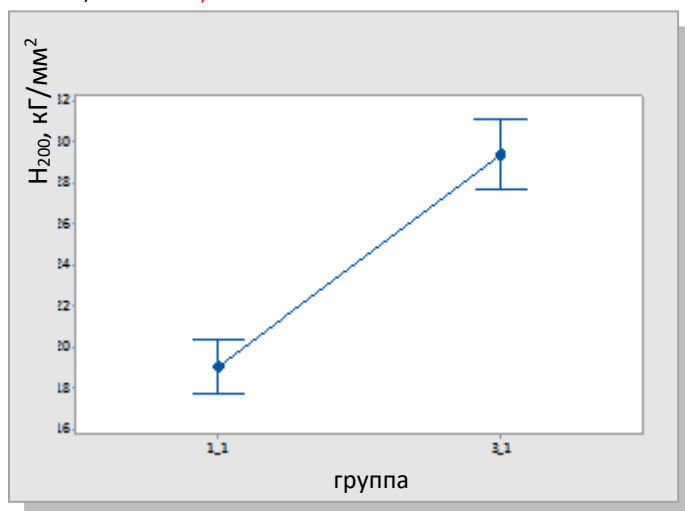
Фактор **Уровень** **Значение**
 Фактор 2 1_1; 3_1

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Seq SS	Вклад	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Фактор	1	591,9	82,70%	591,9	591,896	100,36	0,000
Ошибка	21	123,9	17,30%	123,9	5,898		
Всего	22	715,8	100,00%				

Значения

Фактор	N	Среднее	Ст. Откл.	95% CI
1_1	14	19,050	1,695	(17,700; 20,400)
3_1	9	29,44	3,29	(27,76; 31,13)



Однофакторный дисперсионный анализ для групп: 2_1; 3_1

Нулевая гипотеза Все средние однородны
 Альтернативная гипотеза Существует хотя бы одно отличающееся среднее
 Уровень значимости $\alpha = 0,05$

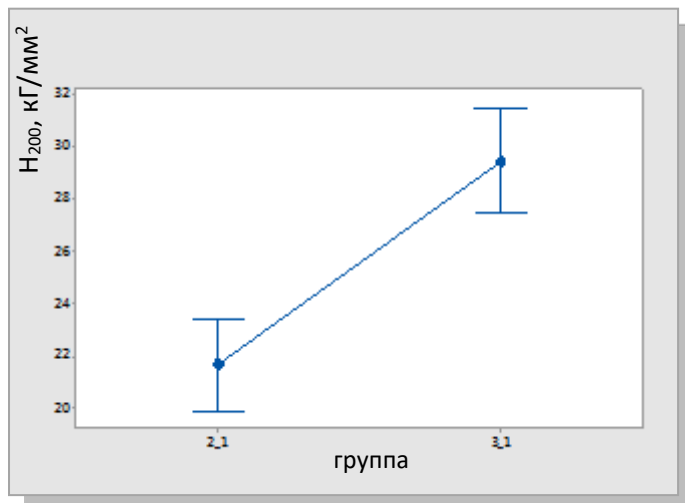
Фактор **Уровень** **Значение**
 Фактор 2 2_1; 3_1

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Seq SS	Вклад	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Фактор	1	311,1	66,10%	311,1	311,111	37,04	0,000
Ошибка	19	159,6	33,90%	159,6	8,398		
Всего	20	470,7	100,00%				

Значения

Фактор	N	Среднее	Ст. Откл.	95% CI
2_1	12	21,667	2,577	(19,916; 23,418)
3_1	9	29,44	3,29	(27,42; 31,47)



Приложение Г
(справочное)

**Изучение влияния геометрии соединения на вырыв крепежного
элемента**

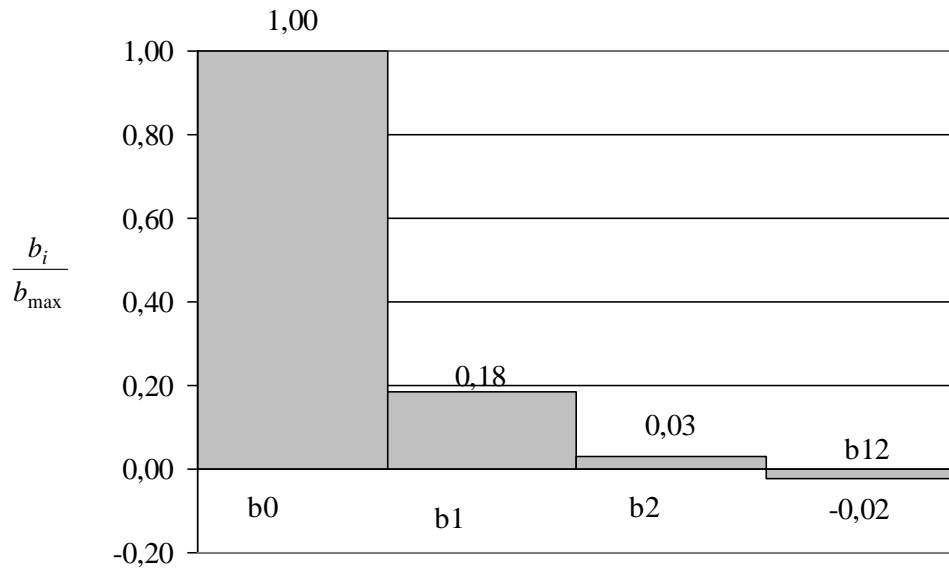


Рисунок Г. 1 – Ранжирование эффектов факторов по t - критерию (критерию Стьюдента), регрессивный анализ

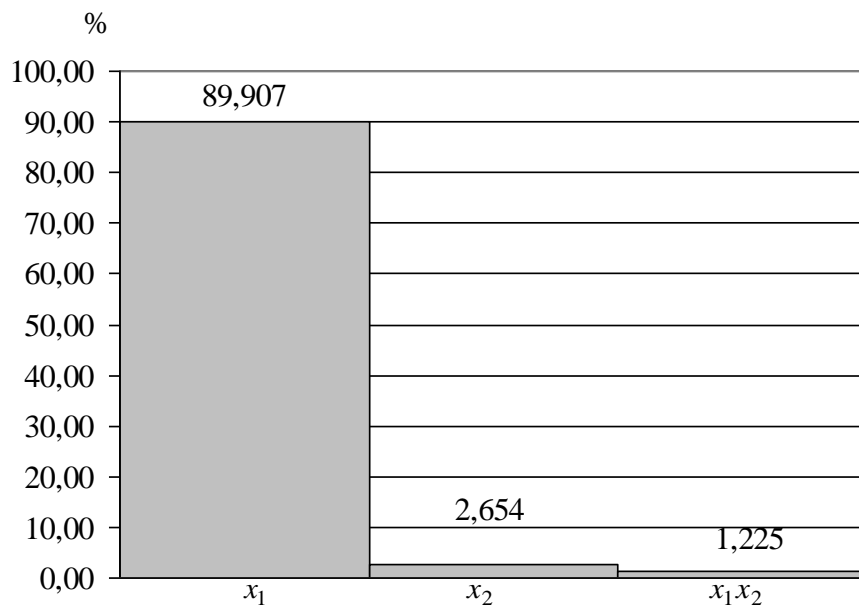


Рисунок Г. 2 – Ранжирование эффектов факторов по F - критерию (критерию Фишера), дисперсионный анализ

Приложение Д
(справочное)

**Изучение влияния расположения крепежных элементов по отношению к
сдвигающей нагрузке**

Таблица Д. 1 – Результаты исследования срезающей силы в соединении
«сталь-композит»

в Н

№ образца	группы							
	1		2		3		4	
	$F_{нук}$	$F_{сдmax}$	$F_{нук}$	$F_{сдmax}$	$F_{нук}$	$F_{сдmax}$	$F_{нук}$	$F_{сдmax}$
1	13281,7	15320,7	14785,7	16855,9	16571,4	17488,3	13281,7	15320,7
2	14000,0	14978,5	11571,4	15017,5	16857,1	17114,0	14000,0	14978,5
3	16517,5	16517,5	14785,7	16386,1	17321,0	17321,0	16517,5	16517,5
4	13000,0	15776,3	13915,8	15988,4	15712,5	16852,3	13000,0	15776,3
5	10285,7	16456,0	13795,6	16103,6	17156,7	17301,2	10285,7	16456,0
6	13785,7	15723,1	11076,5	15524,6	18554,7	18600,0	13785,7	15723,1
7	14785,7	15737,6	13869,6	17112,8	16908,8	17025,6	14785,7	15737,6
8	12642,9	15662,9	14128,3	15649,0	15421,5	16544,1	12642,9	15662,9
9	15715,9	15715,9	14837,5	15700,9	15322,1	16032,0	15715,9	15715,9
10	14714,3	15576,9	15468,5	16423,3	14819,0	16270,6	14714,3	15576,9
11	15278,9	16915,2	14131,0	16003,5	15828,9	16002,5	15278,9	16915,2
12	13586,5	15374,2	13042,4	15977,6	18234,1	18256,5	13586,5	15374,2
13	14585,3	14620,0	15267,5	16419,4	18785,4	18785,4	14585,3	14620,0
14	15066,3	15867,4	12373,0	15219,8	18477,8	18477,8	15066,3	15867,4
15	15376,8	16854,0	14794,9	16746,9	14516,8	16032,0	15376,8	16854,0
16	13808,5	16095,8	16302,5	17062,3	16555,0	16985,0	13808,5	16095,8
17	12355,6	15436,6	15041,1	15936,8	16712,2	17082,3	12355,6	15436,6
18	12788,5	14690,7	14085,3	16405,7	15854,5	16478,2	12788,5	14690,7
19	10857,5	15548,0	10905,6	15454,5	18685,7	18700,0	10857,5	15548,0
20	16057,8	16178,4	11890,5	15937,5	17457,9	17726,5	16057,8	16178,4
21	14550,5	15652,9	12303,5	16854,5	16485,4	16485,4	14550,5	15652,9
22	11355,1	15485,5	14229,8	16576,7	17902,3	17952,0	11355,1	15485,5
23	15886,3	16043,1	12976,7	15385,9	14465,7	15980,0	15886,3	16043,1
24	13156,9	15793,2	15997,5	17022,5	17656,1	17900,0	13156,9	15793,2
25	14908,8	15966,1	13679,8	15419,8	17240,9	17472,0	14908,8	15966,1
26	15603,7	16027,4	14687,8	15935,4	16482,5	16793,3	15603,7	16027,4
27	15985,6	16085,1	13248,5	16934,8	18134,7	18203,9	15985,6	16085,1
28	13357,1	15497,9	12891,9	15564,4	17699,8	17699,8	13357,1	15497,9
29	12285,6	15512,0	12295,9	14982,3	17195,9	17202,0	12285,6	15512,0
30	10586,3	15286,0	13060,3	15996,3	18477,2	18477,2	10586,3	15286,0

Исключение промахов проводилось при помощи контрольных карт собственных значений. На примере образцов 1 группы приведены контрольные карты собственных значений F_{mik} (рисунок Д.1) и $F_{сдmax}$ (рисунок Д.2)⁴⁰.

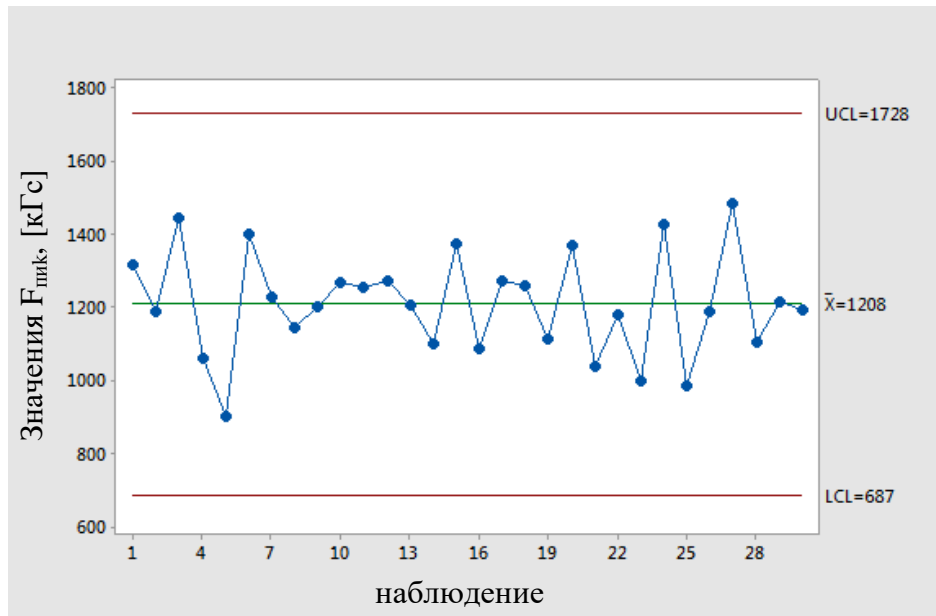


Рисунок Д. 1 – Отсеивание промахов для 1 группы образцов по F_{mik}

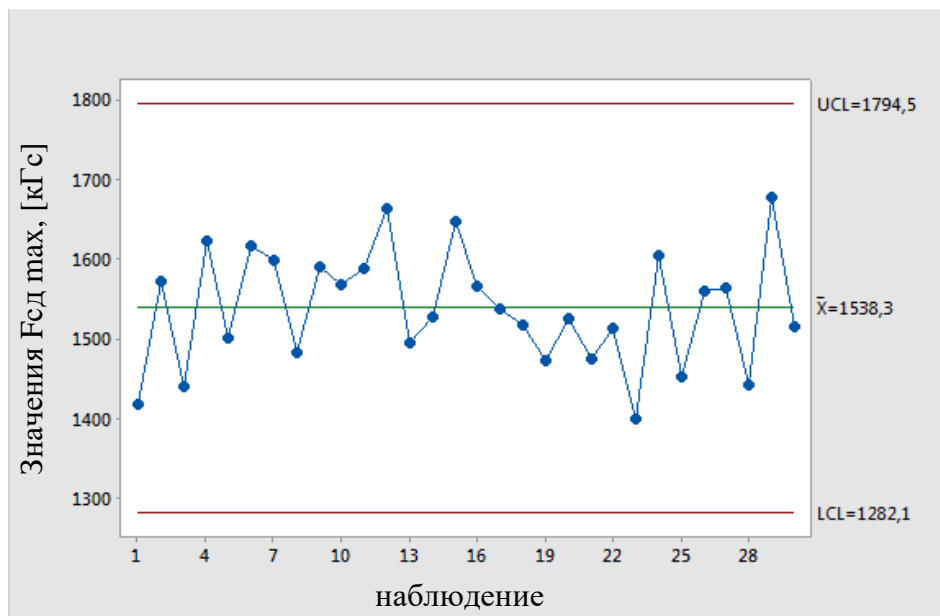


Рисунок Д. 2 – Отсеивание промахов для 1 группы образцов по $F_{сдmax}$

⁴⁰ 1кГс≈10Н

Эмпирическая функция на вероятностной сетке нормального закона распределения представлена на рисунке Д.3.

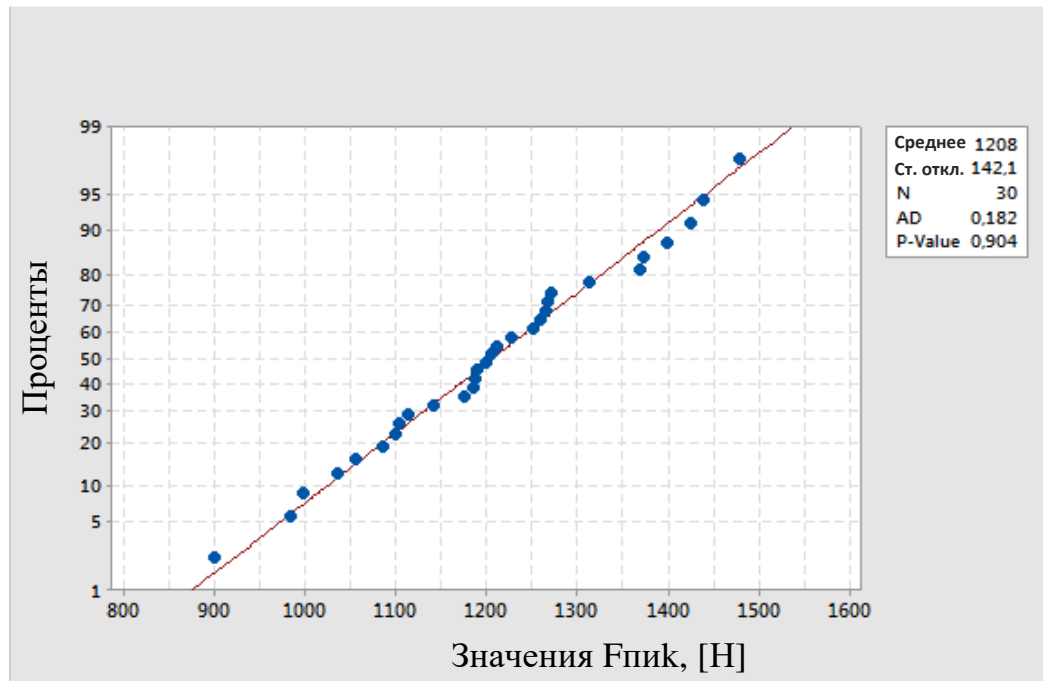


Рисунок Д. 3 – Проверка на нормальность функции распределения $F_{\text{пик}}$ на примере 1 группы образцов

Таблица Д. 2 – Расчет для F_{mik}

в Н.

№ образца	группы											
	1			2			3			4		
	F_{mik}	$\overline{F_{mik}}$	S^2	F_{mik}	$\overline{F_{mik}}$	S^2	F_{mik}	$\overline{F_{mik}}$	S^2	F_{mik}	$\overline{F_{mik}}$	S^2
1	13281,7	12076,8	202030	14785,7	13872,2	291500	16571,4	13714,7	194960	13281,7	16916,5	157250
2	14000,0			11571,4			16857,1			14000,0		
3	16517,5			14785,7			17321,0			16517,5		
4	13000,0			13915,8			15712,5			13000,0		
5	10285,7			13795,6			17156,7			10285,7		
6	13785,7			11076,5			18554,7			13785,7		
7	14785,7			13869,6			16908,8			14785,7		
8	12642,9			14128,3			15421,5			12642,9		
9	15715,9			14837,5			15322,1			15715,9		
10	14714,3			15468,5			14819,0			14714,3		
11	15278,9			14131,0			15828,9			15278,9		
12	13586,5			13042,4			18234,1			13586,5		
13	14585,3			15267,5			18785,4			14585,3		
14	15066,3			12373,0			18477,8			15066,3		
15	15376,8			14794,9			14516,8			15376,8		
16	13808,5			16302,5			16555,0			13808,5		
17	12355,6			15041,1			16712,2			12355,6		
18	12788,5			14085,3			15854,5			12788,5		
19	10857,5			10905,6			18685,7			10857,5		
20	16057,8			11890,5			17457,9			16057,8		
21	14550,5			12303,5			16485,4			14550,5		
22	11355,1			14229,8			17902,3			11355,1		
23	15886,3			12976,7			14465,7			15886,3		
24	13156,9			15997,5			17656,1			13156,9		

Продолжение таблицы Д.2

в Н.

№ образца	группы											
	1			2			3			4		
	F_{mik}	$\overline{F_{nuk}}$	S^2	F_{mik}	$\overline{F_{nuk}}$	S^2	F_{mik}	$\overline{F_{nuk}}$	S^2	F_{mik}	$\overline{F_{nuk}}$	S^2
25	14908,8	12076,8	202030	13679,8	13872,2	291500	17240,9	13714,7	194960	14908,8	16916,5	157250
26	15603,7			14687,8			16482,5			15603,7		
27	15985,6			13248,5			18134,7			15985,6		
28	13357,1			12891,9			17699,8			13357,1		
29	12285,6			12295,9			17195,9			12285,6		
30	10586,3			13060,3			18477,2			10586,3		

Таблица Д. 3 – Расчет для F_{max}

в Н.

№ образца	группы											
	1			2			3			4		
	$F_{сдmax}$	$\overline{F_{сдmax}}$	S^2	$F_{сдmax}$	$\overline{F_{сдmax}}$	S^2	$F_{сдmax}$	$\overline{F_{сдmax}}$	S^2	$F_{сдmax}$	$\overline{F_{сдmax}}$	S^2
1	15320,7	15382,8	52770	16855,9	15746,5	28340	17488,3	16086,6	39160	15320,7	17308,0	75470
2	14978,5			15017,5			17114,0			14978,5		
3	16517,5			16386,1			17321,0			16517,5		
4	15776,3			15988,4			16852,3			15776,3		
5	16456,0			16103,6			17301,2			16456,0		
6	15723,1			15524,6			18600,0			15723,1		
7	15737,6			17112,8			17025,6			15737,6		
8	15662,9			15649,0			16544,1			15662,9		
9	15715,9			15700,9			16032,0			15715,9		

Продолжение таблицы Д.3

в Н.

№ образца	группы											
	1			2			3			4		
	$F_{сдмах}$	$\overline{F}_{сдмах}$	S^2	$F_{сдмах}$	$\overline{F}_{сдмах}$	S^2	$F_{сдмах}$	$\overline{F}_{сдмах}$	S^2	$F_{сдмах}$	$\overline{F}_{сдмах}$	S^2
10	15576,9	15382,8	52770	16423,3	15746,5	28340	16270,6	16086,6	39160	15576,9	17308,0	75470
11	16915,2			16003,5			16002,5			16915,2		
12	15374,2			15977,6			18256,5			15374,2		
13	14620,0			16419,4			18785,4			14620,0		
14	15867,4			15219,8			18477,8			15867,4		
15	16854,0			16746,9			16032,0			16854,0		
16	16095,8			17062,3			16985,0			16095,8		
17	15436,6			15936,8			17082,3			15436,6		
18	14690,7			16405,7			16478,2			14690,7		
19	15548,0			15454,5			18700,0			15548,0		
20	16178,4			15937,5			17726,5			16178,4		
21	15652,9			16854,5			16485,4			15652,9		
22	15485,5			16576,7			17952,0			15485,5		
23	16043,1			15385,9			15980,0			16043,1		
24	15793,2			17022,5			17900,0			15793,2		
25	15966,1			15419,8			17472,0			15966,1		
26	16027,4			15935,4			16793,3			16027,4		
27	16085,1			16934,8			18203,9			16085,1		
28	15497,9			15564,4			17699,8			15497,9		
29	15512,0			14982,3			17202,0			15512,0		
30	15286,0			15996,3			18477,2			15286,0		

Однофакторный дисперсионный анализ (подбор расположения КЭ по отношению к сдвигающей нагрузке)

Однофакторный дисперсионный анализ для: F пик_1; F пик_2; F пик_3; F пик_4

Нулевая гипотеза Все средние однородны
 Альтернативная гипотеза Существует хотя бы одно отличающееся среднее
 Уровень значимости $\alpha = 0,05$

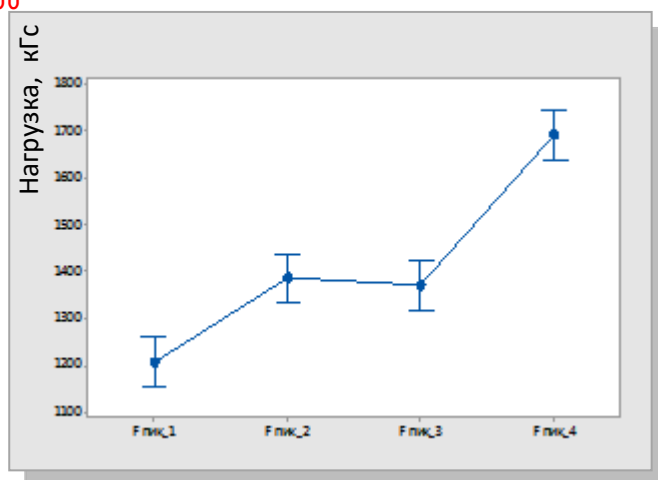
Фактор Уровень Значение
 Фактор 4 F пик_1; F пик_2; F пик_3; F пик_4

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Фактор	3	3665449	1221816	57,79	0,000
Ошибка	116	2452614	21143		
Всего	119	6118063			

Значения

Фактор	N	Среднее	Ст.Откл.	95% CI
F пик_1	30	1207,7	142,1	(1155,1; 1260,3)
F пик_2	30	1387,2	170,7	(1334,6; 1439,8)
F пик_3	30	1371,5	139,6	(1318,9; 1424,0)
F пик_4	30	1691,6	125,4	(1639,1; 1744,2)



Однофакторный дисперсионный анализ для: F пик_1; F пик_2

Нулевая гипотеза Все средние однородны
 Альтернативная гипотеза Существует хотя бы одно отличающееся среднее
 Уровень значимости $\alpha = 0,05$

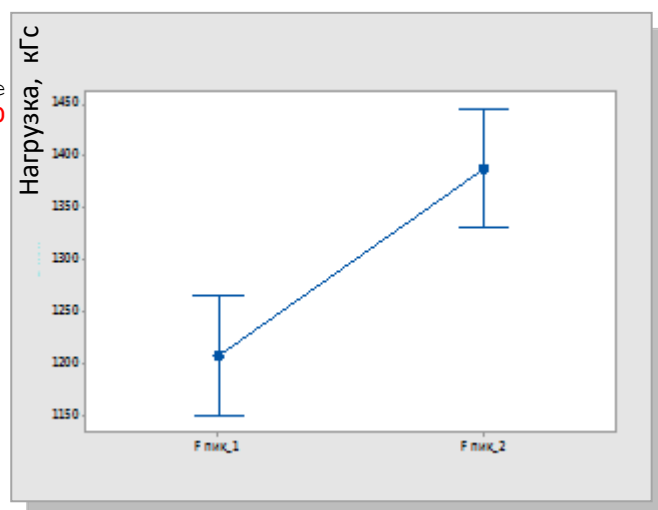
Фактор Уровень Значение
 Фактор 2 F пик_1; F пик_2

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Фактор	1	483560	483560	19,60	0,000
Ошибка	58	1431216	24676		
Всего	59	1914776			

Значения

Фактор	N	Среднее	Ст.Откл.	95% CI
F пик_1	30	1207,7	142,1	(1150,3; 1265,1)
F пик_2	30	1387,2	170,7	(1329,8; 1444,6)



Однофакторный дисперсионный анализ для: F пик_2; F пик_3

Нулевая гипотеза Все средние однородны
 Альтернативная гипотеза Существует хотя бы одно отличающееся среднее
 Уровень значимости $\alpha = 0,05$

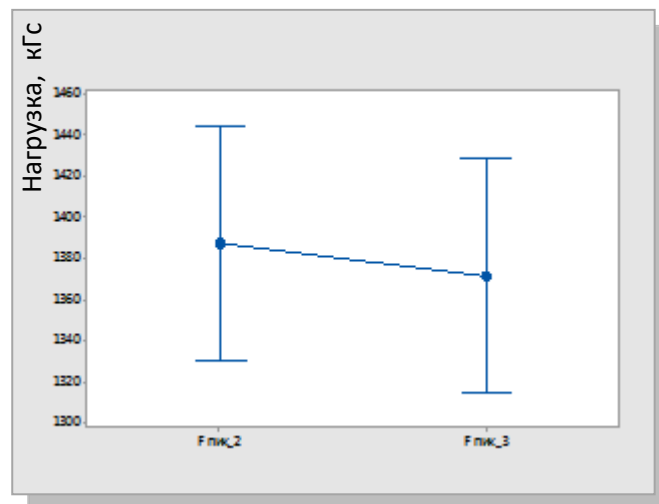
Фактор Уровень Значение
 Фактор 2 F пик_2; F пик_3

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Фактор	1	3724	3724	0,15	0,697!!!
Ошибка	58	1410720	24323		
Всего	59	1414444			

Значения

Фактор	N	Среднее	Ст.Откл.	95% CI
F пик_2	30	1387,2	170,7	(1330,2; 1444,2)
F пик_3	30	1371,5	139,6	(1314,5; 1428,5)



Однофакторный дисперсионный анализ для: F пик_3; F пик_4

Нулевая гипотеза Все средние однородны
 Альтернативная гипотеза Существует хотя бы одно отличающееся среднее
 Уровень значимости $\alpha = 0,05$

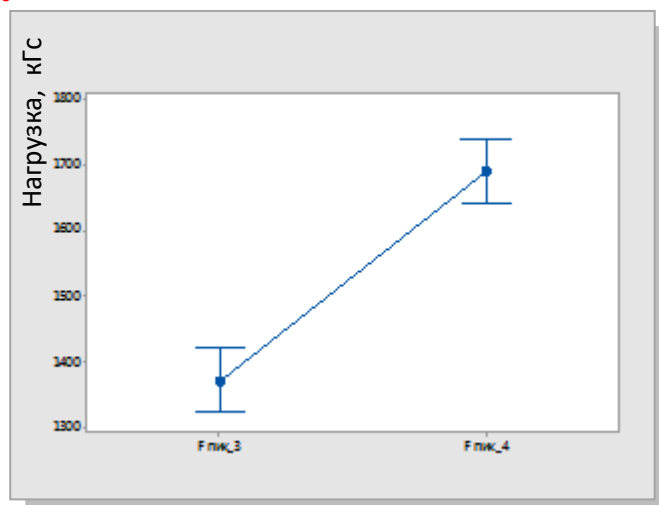
Фактор Уровень Значение
 Фактор 2 F пик_3; F пик_4

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Фактор	1	1537713	1537713	87,32	0,000
Ошибка	58	1021398	17610		
Всего	59	2559111			

Значения

Фактор	N	Среднее	Ст.Откл.	95% CI
F пик_3	30	1371,5	139,6	(1323,0; 1420,0)
F пик_4	30	1691,6	125,4	(1643,1; 1740,1)



Однофакторный дисперсионный анализ для: F сд max_1; F сд max_2; F сд max_3; F сд max_4

Нулевая гипотеза Все средние однородны
 Альтернативная гипотеза Существует хотя бы одно отличающееся среднее
 Уровень значимости $\alpha = 0,05$

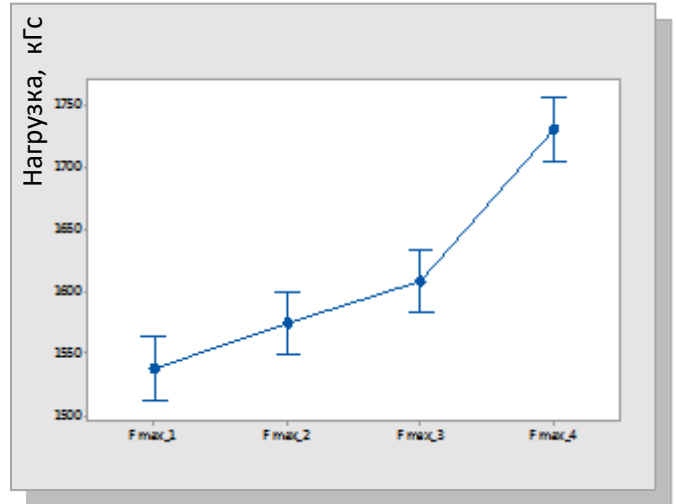
Фактор Уровень Значение
 Фактор 4 F max_1; F max_2; F max_3; F max_4

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Фактор	3	628503	209501	42,81	0,000
Ошибка	116	567653	4894		
Всего	119	1196156			

Значения

Фактор	N	Mean	StDev	95% CI
F max_1	30	1538,3	72,6	(1513,0; 1563,6)
F max_2	30	1574,65	53,23	(1549,35; 1599,95)
F max_3	30	1608,7	62,6	(1583,4; 1634,0)
F max_4	30	1730,8	86,9	(1705,5; 1756,1)



Однофакторный дисперсионный анализ для: F сд max_1; F сд max_2

Нулевая гипотеза Все средние однородны
 Альтернативная гипотеза Существует хотя бы одно отличающееся среднее
 Уровень значимости $\alpha = 0,05$

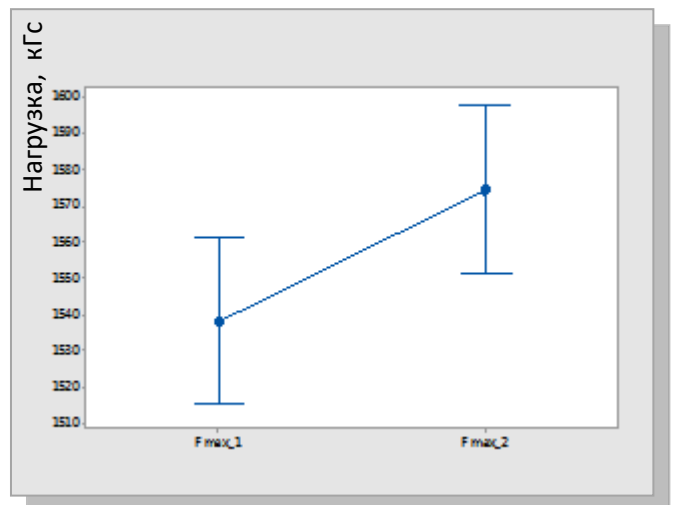
Фактор Уровень Значение
 Фактор 2 F max_1; F max_2

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Фактор	1	19841	19841	4,89	0,031
Ошибка	58	235228	4056		
Всего	59	255069			

Значения

Фактор	N	Mean	StDev	95% CI
F max_1	30	1538,3	72,6	(1515,0; 1561,6)
F max_2	30	1574,65	53,23	(1551,38; 1597,92)



Однофакторный дисперсионный анализ для: F сд max_2; F сд max_3

Нулевая гипотеза Все средние однородны
 Альтернативная гипотеза Существует хотя бы одно отличающееся среднее
 Уровень значимости $\alpha = 0,05$

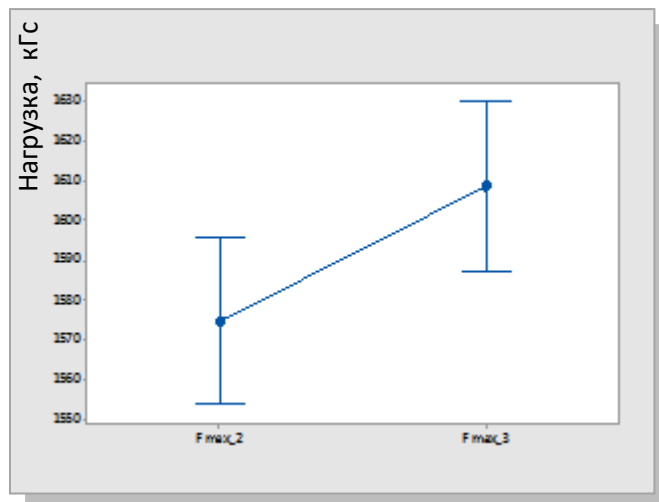
Фактор Уровень Значение
 Фактор 2 F max_2; F max_3

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Фактор	1	17353	17353	5,14	0,027
Ошибка	58	195742	3375		
Всего	59	213095			

Значения

Фактор	N	Mean	StDev	95% CI
F max_2	30	1574,65	53,23	(1553,42; 1595,88)
F max_3	30	1608,7	62,6	(1587,4; 1629,9)



Однофакторный дисперсионный анализ для: F сд max_3; F сд max_4

Нулевая гипотеза Все средние однородны
 Альтернативная гипотеза Существует хотя бы одно отличающееся среднее
 Уровень значимости $\alpha = 0,05$

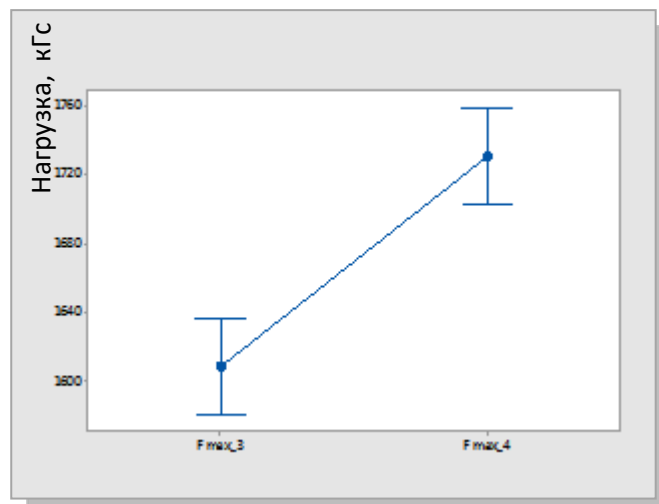
Фактор Уровень Значение
 Фактор 2 F max_3; F max_4

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Фактор	1	223774	223774	39,04	0,000
Ошибка	58	332424	5731		
Всего	59	556198			

Значения

Фактор	N	Среднее	Ст.Откл.	95% CI
F max_3	30	1608,7	62,6	(1581,0; 1636,3)
F max_4	30	1730,8	86,9	(1703,1; 1758,5)



Приложение Е
(справочное)

ИНДИВИДУАЛЬНЫЙ ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬ
ПОПОВА В.А.

Свидетельство о внесении в ЕГРИП 40 № 000765189 от 27.10.2004 г.
Свидетельство о постановке на учет 40 № 0020041 от 19.07.1999 г.

Юр. адрес: 248007, г. Калуга, ул. Вишневого, д. 3, кв. 58
Факт. адрес: 248009, г. Калуга, ул. Грабцевское шоссе, 111
Филиал: 300036 г. Тула, ул. Одоевское шоссе, 55
тел./факс: (4842) 55-66-15, 59-49-99, 59-73-73
ИНН 402700606306
ОГРН 304402730100269
E-mail: agregat@kaluga.ru

р/с 40802810122240100699
в Калужском ОСБ № 8608 г. Калуга
кор/сч 30101810100000000612
БИК 042908612
ОКПО 80780660
ОКАТО 29401000000
ОКВЭД 55.66.1,51.66.2,50.30.1,50.30.2,50.50,50.10.1,50.10.2

№ 048

«02» июня 2015 г.

На запрос о возможности поставки конфузора комбайна кормоуборочного ПН-420 производства ОАО «Тульский комбайновый завод» сообщаем о невозможности поставить вышеуказанный узел в связи с закрытием завода.

Менеджер отдела закупок



Балашов Д.А.

Приложение Ж (справочное)

Конструктивные особенности и технические характеристики кормоуборочного комбайна ПН-420 «Простор»

Прицепной специализированный кормоуборочный комбайн ПН-420 «Простор» может быть использован для заготовки силоса из трав и силосуемых культур, высотой до 1,2м.

Основные конструктивные отличия:

- поворотный (на 90 градусов) силосопровод позволяет грузить измельченную массу в рядом идущий транспорт;
- откидной корпус обеспечивает доступ к измельчающему аппарату;
- привод повышенной надежности.

Главными узлами комбайна являются:

- измельчающий ротор с ножами;
- вал контрпривода;
- редуктор привода.

Небольшой захват машины обеспечивает хорошее копирование неровностей поля, в результате чего сокращаются потери.

Механизм регулировки высоты среза позволяет регулировать высоту среза в пределах от 50 до 350 мм.

Большое окно в задней стенке конфузора обеспечивает доступ к измельчающему ротору. Отличительной особенностью ротора с измельчающими ножами, является модификация с двумя степенями свободы, что увеличивает срок службы ножей.

Для обеспечения оптимального угла выгрузки скошенной массы в транспортное средство в вертикальной плоскости предусмотрен козырек, расположенный в верхней части силосопровода. Угол наклона козырька изменяется натяжением троса, возврат в исходное положение происходит за счет пружины. Для поворота силосопровода в горизонтальной плоскости предусмотрена система рычагов.

Агрегатируется комбайн с тракторами тягового класса 1.4 - 2.0 при частоте вращения вала отбора мощности (ВОМ) 545 об/мин.

Основные технические характеристики комбайна приведены в таблице Ж.1.

Таблица Ж. 1 – Технические характеристики кормоуборочного комбайна ПН-420 «Простор».

Наименование параметра	Единицы измерения	Значение
Производительность за час основного времени	т	18
Ширина захвата	м	1,5
Высота подачи скошенной массы	м	3,5
Рабочая скорость	км/ч	8
Транспортная скорость	мм	20
Габаритные размеры:	мм	
длина		4300
ширина		2932
высота		3500
Длина измельченной массы	мм	12÷200
Потери	%	До 1,5
Дорожный просвет	мм	450
Высота среза	мм	50÷350
Частота вращения измельчающего ротора	об/мин	1460
Масса конструктивная	кг	950

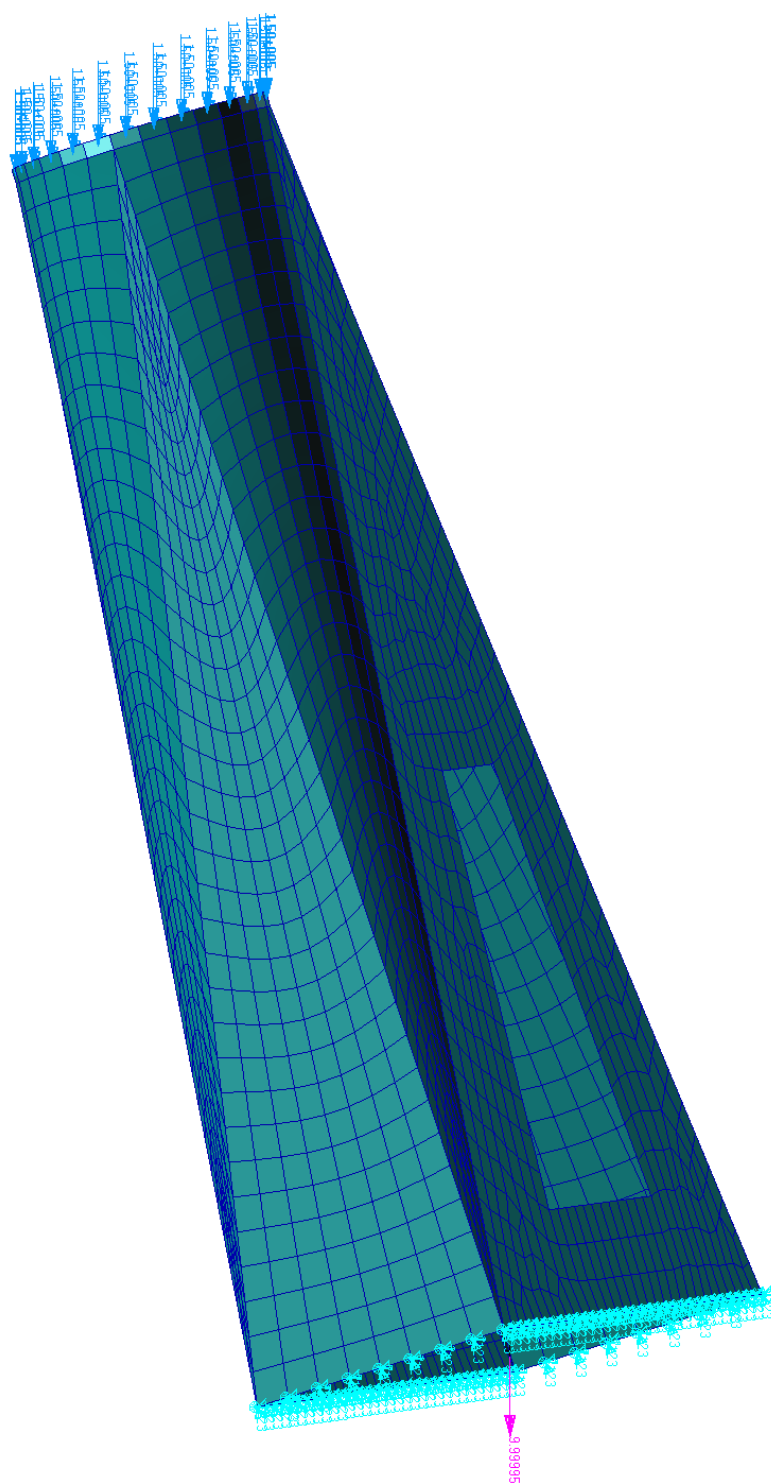
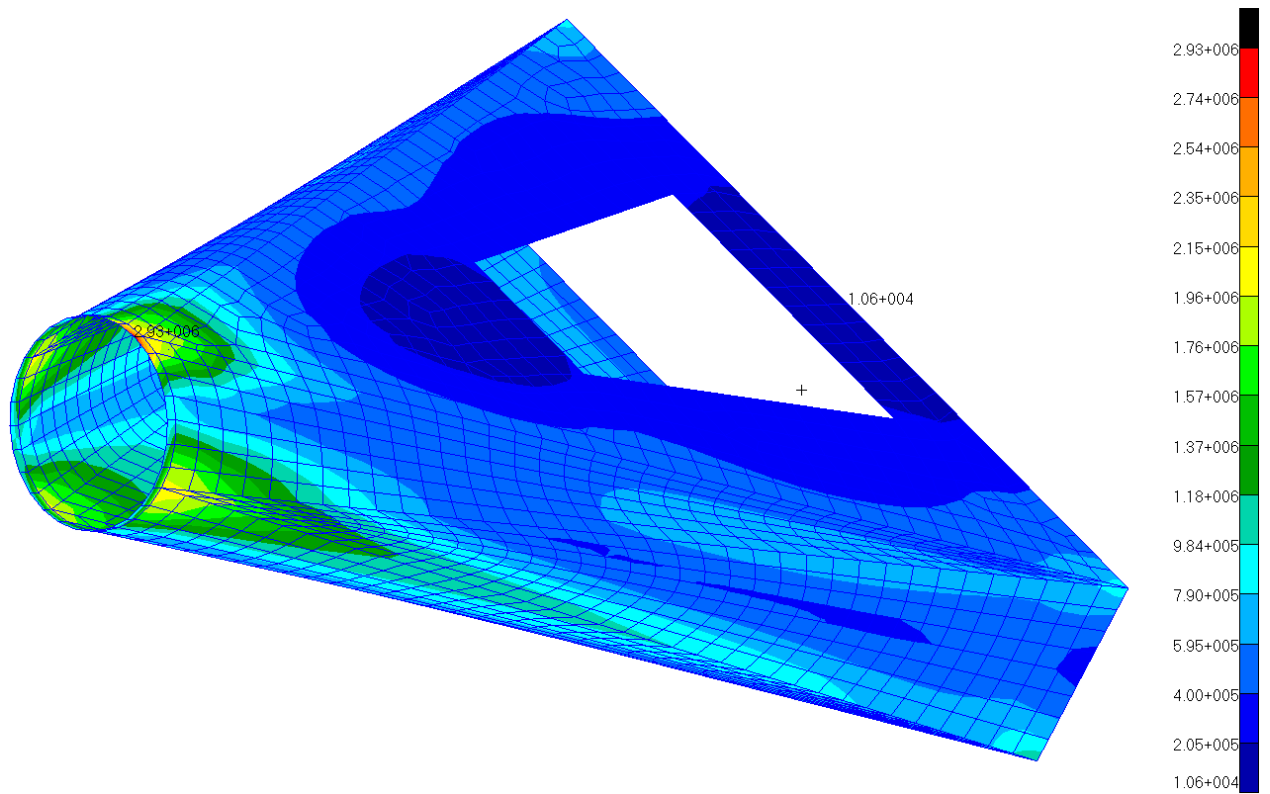
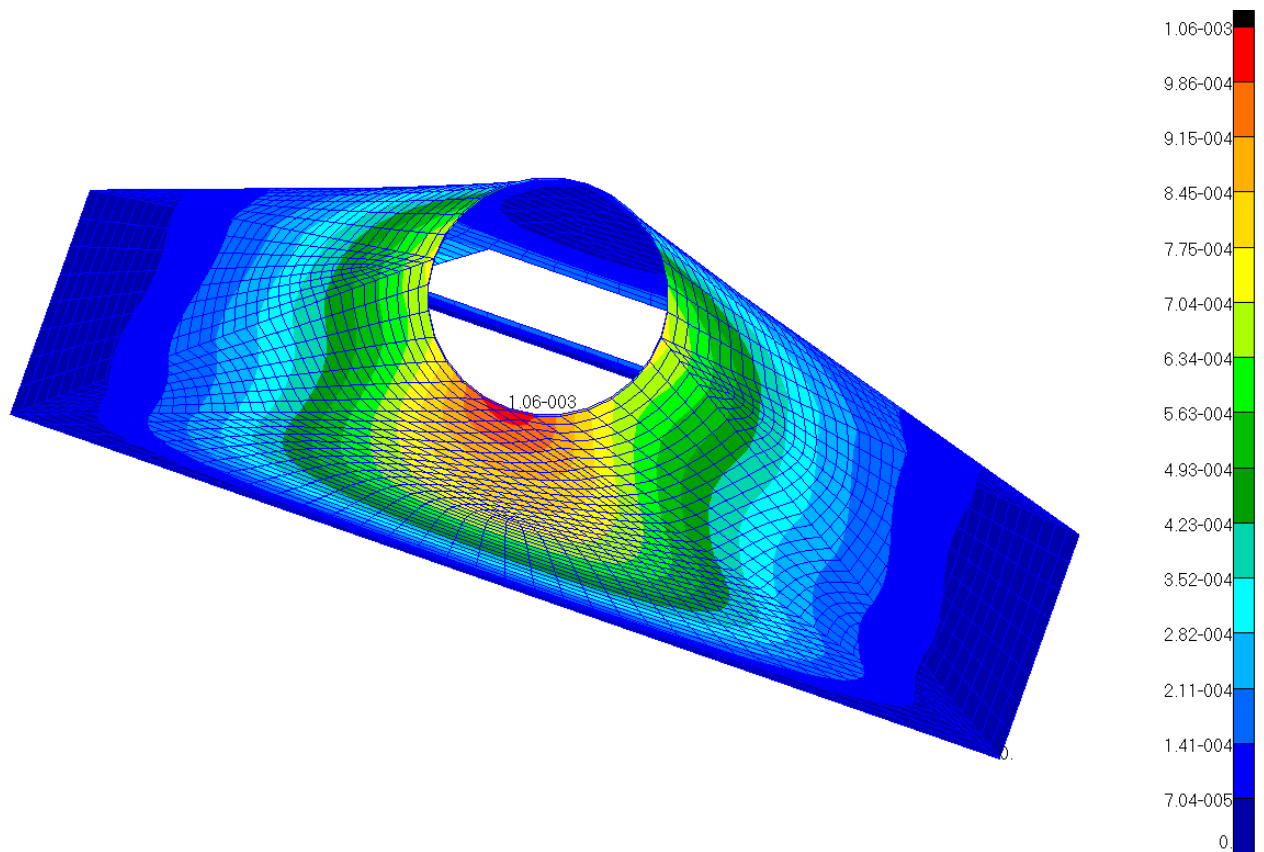


Рисунок Ж. 1 – Расчётная система конфузора



а)



б)

Рисунок Ж. 2 – Распределение эквивалентных напряжений в конфузоре, Па (а),
Распределение суммарных перемещений в конфузоре, м (б)

Приложение И
(обязательное)

Акты внедрения результатов диссертационного исследования



Общество с ограниченной ответственностью

Технический центр

«АГРИТ»

248009, г. Калуга, ул. Грабцевское шоссе, 111, тел./ф: (4842) 59-49-99

ИНН 4029039456, КПП 402901001, ОГРН 1084029002661,

www.agregat.kaluga.ru, e-mail: agregat@kaluga.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Начальник отдела сервиса
ООО ТЦ «Агрит»

Мишин К.Н.

03 2017 г.



для представления
в Диссертационный совет

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Данный акт подтверждает, что отдельные результаты исследований, полученные **СОРОКИНОЙ Ириной Игоревной**, были использованы при восстановлении опытных образцов клапанных крышек дизельных двигателей внутреннего сгорания, установленных на сельскохозяйственной и автомобильной технике: Cummins QSM11, Cummins QSX15, Cummins ISF 2.8/3.8.

Для оптимизации ремонта указанных деталей и повышения надежности их функционирования на ООО ТЦ «Агрит» внедрен вариант изготовления крышки из полимерного композиционного материала с креплением к стальному корпусу дизеля при помощи ряда крепежных элементов с лопатообразной законцовкой.

Руководство ООО ТЦ «Агрит» отмечает целесообразность применения результатов исследовательской работы в ремонтных предприятиях АПС, в том числе и при восстановлении и упрочнении рабочих поверхностей самотечных устройств, бункеров, силосопроводов, конфузоров и пр. деталей, работающих в условиях интенсивного износа под действием сыпучих грузов.

Крестьянское – фермерское хозяйство «ГОРЯЧИЙ КЛЮЧ»

Россия
644505, Омская область,
Омский район, п. Горячий Ключ,
ул. Тополиная, 3
Тел/факс: 931 -172

ИНН – 5528008568
КПП – 552801001

«УТВЕРЖДАЮ»
глава КФХ «Горячий Ключ»
Ю.С. Щербак
« / / 2017 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Результаты научно-исследовательской работы Сорокиной Ирины Игоревны «Восстановление сельскохозяйственной техники при ремонте полимерными композиционными материалами», внедрены в крестьянском (фермерском) хозяйстве «Горячий Ключ» в 2016 году.

На основании положений и результатов исследований, изложенных в работе, при восстановлении кормоуборочной техники в крестьянском (фермерском) хозяйстве «Горячий Ключ» была внедрена конструкция соединений «сталь-композит» и методика определения несущей способности соединения.

Члены КФХ «Горячий Ключ»:

Щербак М.Ю.
Щербак М.Ю.

Щербак А.Н.
Щербак А.Н.

Козловский Н.П.
Козловский Н.П.

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО КАЛУЖСКИЙ ТУРБИННЫЙ ЗАВОД



Российская Федерация, 248010, г. Калуга, ул. Московская, 241
Телефон: (4842) 76-70-54
Факс: (4842) 56-22-90

Сертифицировано
Русским Регистром

«29» 12 2014 г. № 157/31-14

На № _____ от «__» _____ 2014г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер ОАО «КТЗ»
кандидат технических наук

С.Д. Циммерман
С.Д. Циммерман

«__» _____ 2014г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования *Сорокиной Ирины Игоревны* в проектно-конструкторских работах.

Настоящий акт составлен о том, что предложенная в диссертации *Сорокиной И.И. методика расчета металло-композитных узлов* применена при проектировании изделий ОАО «КТЗ» для решения задач исследующих напряженно-деформированное состояние конструкций, что позволяет снизить трудоемкость расчетных работ.

Указанная методика опубликована: Сравнительный анализ расчета и статических испытаний металло-композитного соединения с дискретными связями / М.В. Астахов, И.И. Сорокина / Известия вузов. Машиностроение. – 2014. – №10(655). – С.9-16.

Отмечается целесообразность использования разработок и рекомендаций кандидатской диссертации Сорокиной И.И. в практической работе промышленных предприятий.

Главный конструктор –
начальник испытательного центра,
доктор технических наук

И.М. Дикарев
И.М. Дикарев

Генеральный конструктор

Л.А. Мамонов
Л.А. Мамонов



ООО «ДизельПрофРемонт»

248000, г. Калуга, Одоевское шоссе, 5,
тел. 8 (4842) 79-81-32

*Для предоставления
в диссертационный совет*

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационного исследования Сорокиной Ирины Игоревны в ремонтных работах

Настоящий акт составлен о том, что предложенная в диссертации Сорокиной И.И. технология изготовления металло-композитных узлов применена при ремонте опытного образца кожуха маховика ДВС производства Cummins, серии «L», устанавливаемых на автобусах, грузовых автомобилях, дизель-генераторных установках, погрузчиках и карьерной технике. Данная технология позволяет выполнить восстановление детали в условиях ремонтной мастерской с минимальными затратами.

Руководство компании ООО «ДизельПрофРемонт» отмечает целесообразность использования конструкторско-технологических решений и рекомендаций, предложенных в кандидатской диссертации Сорокиной И.И. в практической работе ремонтных предприятий.

Технический директор
ООО «ДизельПрофРемонт»



Журавлев Д.В.

Начальник цеха

Штыков А.И.

Главный бухгалтер

Огородник О.В.



ООО «ДизельПрофРемонт»

248000, г. Калуга, Одоевское шоссе, 5,
тел. 8 (4842) 79-81-32

*Для предоставления
в диссертационный совет*

**АКТ
эксплуатационных испытаний опытного образца**

Мы, ниже подписавшиеся представители ООО «ДизельПрофРемонт» технический директор Журавлев Д.В., начальник цеха Штыков А.И. с одной стороны и старший преподаватель КФ ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана Сорокина И.И., с другой, составили настоящий акт об эксплуатационных испытаниях опытного образца кожуха маховика двигателя внутреннего сгорания Cummins серия L.

Машина – погрузчик, режим работы – 2-х сменный.

Время (календарная продолжительность) эксплуатации до наступления гарантийного срока (1000 моточасов) – 4 месяца (с 1.02.2015 по 1.06.2015г.). Время эксплуатации до проведения ТО опытного образца – 0,5 года (с 1.06.2015 по 31.12.2015г.).

Во время пуско-наладочных работ и гарантийного срока (полгода или 1000 моточасов, что наступит раньше) отказа двигателя, по причине недостаточной долговечности восстановленного кожуха или мест присоединения его к стальному корпусу изделия не зарегистрировано. Двигатель находится в работоспособном состоянии и пригоден для дальнейшей эксплуатации.

Технический директор
ООО «ДизельПрофРемонт»



Журавлев Д.В.

Начальник цеха

Штыков А.И.

Старший преподаватель
КФ ФГБОУ ВПО МГТУ
им. Н.Э. Баумана

Сорокина И.И.

«УТВЕРЖДАЮ»
 Заместитель директора
 по учебной работе
 КФ ФГБОУ ВПО МГТУ
 им. Н.Э. Баумана,
 д.э.н., профессор



О.Л. Перерва
 2015г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс методики расчета металло-композитных узлов

Комиссия в составе председателя декана факультета фундаментальных наук, к.т.н., доцента Е.К. Галемина и членов комиссии: заведующего кафедрой «Прикладная механика», д.т.н., профессора М.В. Астахова, заведующего секцией «Сопrotивление материалов», ст. преподавателя Е.С. Зуева, к.т.н., доцента Г.И. Насоновой, к.ф.-м.н., доцента, И.А. Зенкиной составила настоящий акт о том, что при проведении учебной и научно-исследовательской работы на кафедре «Прикладная механика» в Калужском филиале Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», (КФ ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана) внедрена методика расчета металло-композитных узлов для решения задач, исследующих напряженно-деформационное состояние конструкций, предложенная в диссертационном исследовании Сорокиной И.И.

Указанная методика применяется в лекционных и практических курсах дисциплины «Сопrotивление материалов» для студентов, обучающихся по машиностроительным направлениям подготовки, опубликована: Астахов, М.В. Расчет на прочность металл-композитных соединений с дискретными связями / М.В. Астахов, И.И. Сорокина // Конструкции из композиционных материалов. – 2014. – вып.4(136). – С.8-14.

Председатель комиссии

Е.К. Галемин

Члены комиссии:

Подписи: Е.К. Галемина,
 Е.С. Зуева,
 Г.И. Насоновой,
 И.А. Зенкиной
 заверяю
 спущ. по кадр. п.: А.И. Сорокина (И.И.)



М.В. Астахов
 Е.С. Зуев
 Г.И. Насонова
 И.А. Зенкина