


На правах рукописи



Сорокина Ирина Игоревна

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

05.20.03 – Технологии и средства технического обслуживания
в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Калуга – 2017

Работа выполнена в Калужском филиале федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет)» (КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Астахов Михаил Владимирович

Официальные оппоненты: **Башкирцев Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ДПОС «Российская инженерная академия менеджмента и агробизнеса», профессор кафедры «Технический сервис и гостехнадзор»;
Живогин Александр Анатольевич, кандидат технических наук, 4-ое научно-исследовательское испытательное управление войсковой части 15650 (войсковая часть 15650-16) Министерства обороны Российской Федерации, инженер-испытатель

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» (ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева)

Защита состоится 22 июня 2017 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 220.010.04, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра 1» (Воронежский ГАУ), по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учебный корпус агроинженерного факультета (корпус № 3), аудитория 319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского ГАУ и на сайте www.vsau.ru («Информация о деятельности диссертационных советов» – «Защиты» – «Д 220.010.04»), а также по ссылке: <http://ds.vsau.ru/?p=4642>.

Автореферат разослан 21 апреля 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета Д 220.010.04



Афоничев Дмитрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Старение используемых машин и оборудования значительно опережает темпы технического перевооружения. По различным экспертным оценкам сокращение машинно-тракторного парка составило 60-80 %; за пределами сроков амортизации работают 50-80 % техники; коэффициент обновления техники 1,1-6,2 %, вместе с тем финансовые ресурсы большинства сельскохозяйствопроизводителей ограничены. В таких условиях перспективным является развитие системы технического сервиса, а также модернизации техники, бывшей в эксплуатации.

По мнению ряда авторов, повышение надежности модернизированных машин должно произойти за счет использования более совершенных конструкций агрегатов и новых материалов, таких как полимерные композиционные материалы (ПКМ). Верификация использования полимерных нанокompозитов в техническом сервисе находится на начальном этапе, 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.

Наряду с созданием новых узлов из ПКМ актуальными являются разработка конструктивных решений соединений 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, 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 освещении проблем создания и применения ПКМ, в том числе и модифицированных нанодобавками, имеют фундаментальные работы Берлина А.А., Бородулина А.С., Васильева В.В., Жач-

кина 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 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 корпусных деталей 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, работающих в агрессивных средах, при ремонте сельскохозяйственной техники с применением ПКМ.

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 **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 выдерживающей 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:

- рекомендации по увеличению износостойкости поверхности ламинатных полимерных композитов к истиранию под действием подвижных абразивных сред, позволяющие повысить эффективность после-ремонтной эксплуатации деталей сельскохозяйственных машин, изготовленных из ПКМ;
- соединение композитных и металлических частей конструкций при помощи КЭ новой формы, позволяющее повысить эффективность

восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники при ремонте;

- усовершенствованная методика расчета на прочность соединения «сталь-композит» для использования при ремонте сельскохозяйственной техники, позволяющая обосновать параметры разработанного соединения;

- 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 проекторочных 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 (НТК) «Наукоемкие технологии в приборо- 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 ведущих рецензируемых научных изданиях.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении в соответствии с ГОСТ Р 7.01.11-2011 отражены: актуальность темы исследования, степень ее разработанности, цель и задачи исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе рассмотрено состояние исследований в области применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) для восстановления сельскохозяйственной техники. В частности, изучено применение наномодифицированных ПКМ; проанализированы существующие варианты соединений «сталь-композит»; рассмотрены преимущества и недостатки известных способов восстановления тонкостенных листовых корпусных деталей сельскохозяйственной техники.

Обзор доступной информации показал, что ПКМ крайне мало применяются при модернизации корпусных деталей, бункеров, силосопроводов и пр., работающих в условиях коррозии или повышенного износа, несмотря на то, что именно в этом направлении применение модифицированных ПКМ технологически обосновано и имеет большой потенциал. Кроме того, при ремонте машин, снятых с производства по разнообразным причинам, применение ПКМ, в качестве заменяющего сталь материала, может стать рациональным решением в условиях ремонтных мастерских (при наличии подходящего оборудования) с учетом отсутствия запасных частей. Наиболее перспективными, но вместе с тем наименее изученным для ламинатных ПКМ, является комбинированное клеештифтовое соединение «сталь-композит». Отсутствуют простые методики расчета и рекомендации по созданию подобных соединений. Таким образом, к недостаточно изученным аспектам темы относятся: подбор ПКМ (ввиду отсут-

ствия баз данных) и модификация его в зависимости от нужд потребителя; соединение «сталь-композит», а также простой, но эффективный метод расчета на прочность указанного соединения.

Во второй главе рассмотрены теоретические предпосылки повышения эффективности ремонта на основе ПКМ тонкостенных корпусных узлов сельскохозяйственной техники, а именно: произведен и теоретически обоснован подбор компонентов ПКМ; предложены варианты изготовления стыковочных узлов «сталь-композит», а также теоретически обоснованная методика их проектировочного расчета.

По мнению ряда экспертов, наиболее подходящими для ремонта машин и оборудования, являются эпоксидные смолы, комплекс свойств которых отвечает всем необходимым требованиям. Из различного вида армирующих волокон для сельхозмашиностроения наиболее приемлемы стеклянные, имеющие высокие механические характеристики, стойкость к атмосферным воздействиям и низкую себестоимость. В связи с этим, для дальнейшего исследования выбран ПКМ на основе стеклоткани Т-10 и связующего – эпоксидной смолы ЭД – 6 с отвердителем ПЭПА и пластификатором ДБФ. В качестве модификаторов выбраны порошки бемита $Al(OOH)$ и корунда Al_2O_3 , которые, увеличивают износостойкость поверхности к действию подвижных абразивных сред и, предположительно, помогут добиться увеличения поверхностной твердости. При этом неизученным остается вопрос влияния указанных порошков (их наличие и степень присутствия) на прочностные свойства выбранных ПКМ.

Опираясь на проведенный обзор литературы, сделан вывод, что замена стальных узлов и деталей композитными технологически возможна. Наиболее сложным в этом случае является решение задачи по проектированию и расчету метало-композитных узлов. Одним из возможных вариантов 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. 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. Таким образом, для дальнейшего изучения в качестве перспективных выбраны: игольчатый КЭ (широко применяемый, например, в авиации), цилиндрический штифт с законцовкой в виде треугольной пластины, а также новый КЭ – цилиндрический штифт с копьеобразной (лопатообразной) законцовкой. Последний, учитывая специфику ламинатных ПКМ, должен обеспечить более прочное соединение. Предположительно, на усилие, выдерживаемое разрабатываемым соединением, будут влиять форма, расположение плоскостей законцовок КЭ по отношению к нагрузке и геометрия

соединения. Указанное соединение в большинстве эксплуатационных случаев находится в сложном напряженном состоянии, для расчета целесообразно применить принцип независимости действия сил. Самым простым расчетным случаем является срез цилиндрической части КЭ. Таким образом, главная задача при конструировании подобного соединения подобрать сочетания параметров так, чтобы определяющим был срез КЭ. Тогда действующую нагрузку в первом приближении можно разделить на осевую – срезающую КЭ, и нормальную – выдергивающую КЭ. Определить последнюю является сложной задачей, так как в настоящее время не существует экспериментально подтвержденных методик ее нахождения.

В рамках данного исследования спланирован и проведен ряд экспериментов с целью получения расчетной методики. Проектировочный расчет изучаемого соединения состоял в выборе параметров соединения, удовлетворяющих условиям прочности: на срез КЭ; на смятие КЭ и соединяемых им деталей; на разрушение от КЭ до края детали (или до следующего ряда КЭ); на разрушение деталей по ослабленному сечению от их растяжения/сжатия, на разрушение адгезионного соединения сталь-ПКМ, а также на разрыв соединения под действием растягивающей силы. Для уточнения расчетов и построения корректной методики, действие внутренних сил в КЭ учитывалось путем решения статически неопределимой задачи методом сил с определением коэффициента перенапряжения K (КЭ, расположенные вдоль действия срезающей силы, нагружены неодинаково). Кроме того, введен безразмерный коэффициент K_p , отражающий влияние расположения плоскостей КЭ (в частности копьеобразных) по отношению к срезающей нагрузке на несущую способность рассматриваемого соединения, величина и правомерность введения которого уточнены после проведения и обработки соответствующих экспериментов.

Рассмотрен расчет при проектировании соединений типа: «нахлестка», рис. 1а (в связи с возможностью его использования при креплении листа или профиля из ПКМ к любому стальному профилю); «пакет», рис. 1б (для выполнения двухстороннего крепления, с симметричным съемом нагрузки).

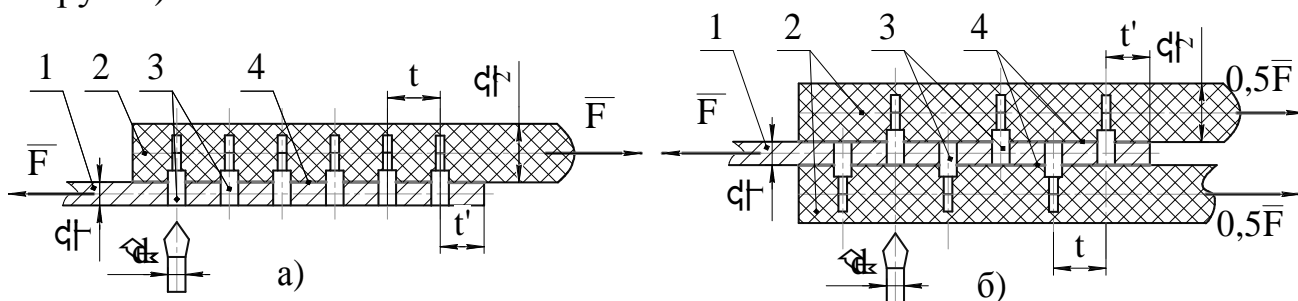


Рисунок 1 – Схемы соединения «сталь-композит»,

1 – стальная пластина, 2 – деталь(и) из полимерного композиционного материала (ПКМ), 3 – крепежные элементы (КЭ), 4 – эпоксидный клей

Основным при проектировании изучаемого соединения, как отмеча-

лось ранее, является расчет КЭ на срез, в котором кроме расположения КЭ, необходимо учесть их податливость: $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C$, где n – количество и номер КЭ в продольном ряду (на рис.1 $n=6$).

$$C = C_{II} / A_{КЭ}, \quad (1)$$

где C_{II} , [мм³/Н]– коэффициент податливости КЭ (зависит от его формы); $A_{КЭ}$, [мм²] – площадь поперечного сечения цилиндрической части КЭ.

$$\text{Коэффициент перенапряжения} \quad K = Q_{\max} / F \quad (2),$$

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

Для определения всех Q_i и вывода уточненной формулы расчета КЭ на срез воспользуемся методом сил. Основная система (ОС) метода сил для заданной системы с $n=6$ КЭ (рис. 1а) приведена на рис 2.

Разрезая k замкнутых контуров ($k=n-1$), получим $3k$ раз статически неопределимую систему, внутренние поперечные силы Q_i и изгибающие моменты M_i учтем податливостью связей (КЭ) и соединяемых листов.

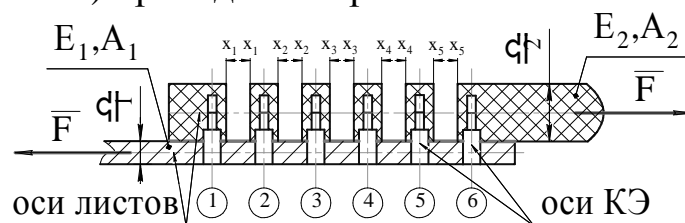


Рисунок 2 – Основная система (ОС) метода сил при $n=6$

Основополагающими значениями при подсчете неизвестных в системе канонических уравнений метода сил будут внутренние продольные силы N_i . ОС станет k статически неопределимой (учитываются только продольные $X_k=1$). Метод сил позволяет получить трехдиагональную матрицу коэффициентов системы канонических уравнений, для соединения с любым количеством КЭ. В общей форме уравнения запишутся в виде:

$$\delta_{k,k-1} \cdot X_{k-1} + \delta_{k,k} \cdot X_k + \delta_{k,k+1} \cdot X_{k+1} = -\Delta_{kP}, \quad (3)$$

где k – количество участков, на которое разделяется всеми n КЭ поверхность стыка. Значения коэффициентов δ_{ij} определяются по формуле:

$$\delta_{ij} = \sum_{i,j=1}^n \int \frac{N_i N_j}{E_i A_i} ds + \sum_{i,j=1}^n \int \frac{M_i M_j}{E_i J_i} ds, \quad (4)$$

где первое слагаемое будет приближенно определяться способом Верещагина, а второе – на основе методики, предложенной Степиным П.А.*

Коэффициенты канонических уравнений выписываются в виде:

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= \delta_{22} = \delta_{33} = \delta_{44} = \delta_{55} = II; \\ \delta_{12} &= \delta_{21} = \delta_{23} = \delta_{32} = \delta_{34} = \delta_{43} = \delta_{45} = \delta_{54} = -C; \\ \delta_{13} &= \delta_{14} = \delta_{15} = \delta_{24} = \delta_{25} = \delta_{31} = \delta_{35} = \delta_{41} = \delta_{42} = \delta_{51} = \delta_{52} = \delta_{53} = 0; \\ \Delta_{1F} &= \Delta_{2F} = \Delta_{3F} = \Delta_{4F} = FII_1; \quad \Delta_{5F} = F(II_1 + C), \end{aligned}$$

*

Степин, П.А К расчету на срез соединений с прерывными связями / П.А. Степин // Вестник инженеров и техников. – 1951. – №4. – С. 175-179.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований и их анализ.

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 . Установлено, что: введение в матрицу указанных порошков значительно снижает предел прочности ПКМ, однако, ориентацией слоев стеклоткани минимум в трех направлениях и введением порошка только в покрытие, можно сократить снижение предела прочности, примерно до 10-11 %; вид добавляемого порошка не оказывает значимого влияния на предел прочности; введение в покрытие ПКМ порошков бемита и корунда повышает микротвердость на 15 % и 55 % соответственно; согласно данным ФГБНУ ГОСНИТИ твердость ПКМ с подобным покрытием увеличивается в 2 раза, указанные порошки увеличивают коррозионную стойкость покрытия, а применение бемита повышает вязкость разрушения.

Затем определяли параметры изучаемого соединения. В ходе проведения первой серии экспериментов – определение сравнительных характеристик соединений для выявления рациональной формы КЭ (цилиндрический игольчатый, штифт с законцовкой в виде треугольной пластины и штифт с копьеобразной законцовкой) – установлено, что при равной глубине заделки копьеобразная форма КЭ дает наиболее прочное соединение.

После чего был реализован и обработан полный факторный эксперимент (ПФЭ 2²), в котором наконечники КЭ изготавливались лопатообразной (копьеобразной) формы и отличались шириной лопатки – a , [мм] – x_1 и глубиной ее внедрения в ПКМ – l_3 , [мм] – x_2 . Обработка ПФЭ 2² позволила получить уравнение регрессионного анализа (10) и расчетную модель (11) зависимости нормального вырывающего усилия $F_{B \max}$, [Н] от выбранных факторов:

$$y(F_{B \max}) = 1633,121 + 300,904x_1(a) + 51,696x_2(l_3) - 35,121x_1x_2(al_3) \quad (10)$$

$$F_{B \max} = -923,245 + 344,43a + 58,25l_3 - 6,69al_3, \text{ [Н]} \quad (11)$$

Установлено, что 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. Анализ диаграмм нагружения показал, что можно увеличить отклик, усовершенствовав геометрию КЭ. Одним из возможных вариантов является изготовление внедряемого КЭ с утолщенной частью «копья», примыкающей к цилиндрической части КЭ – «с утолщенными плечиками».

Вторая серия экспериментов – определение сравнительных характеристик соединений для выявления рационального расположения КЭ в теле ПКМ – была направлена на исследование характера разрушения соедине-

ния под действием осевой силы (вдоль соединяемых пластин).

В первой части серии образцы подразделялись на группы по форме используемых КЭ (цилиндрический игольчатый элемент – наиболее распространенный, копьеобразный (лопатообразный) элемент – показавший лучшие характеристики в исследованиях, приведенных выше) и их расположению (рядное, в шахматном порядке).

Установлено следующее:

- соединения на основе копьеобразных (лопатообразных) КЭ выдерживают сдвиговые нагрузки приблизительно в 1,5 раза большие, чем аналогичные соединения на основе игольчатых;

- их разрушение происходит за счет среза цилиндрической части КЭ по плоскости соединения, в то время как игольчатые КЭ вырываются из тела композита;

- при равной глубине заделки наиболее прочное соединение дает копьеобразная (лопатообразная) форма КЭ с их рядным расположением.

Поэтому в качестве объекта дальнейшего изучения выбраны образцы с рядным размещением КЭ копьеобразной (лопатообразной) формы, рис.3.

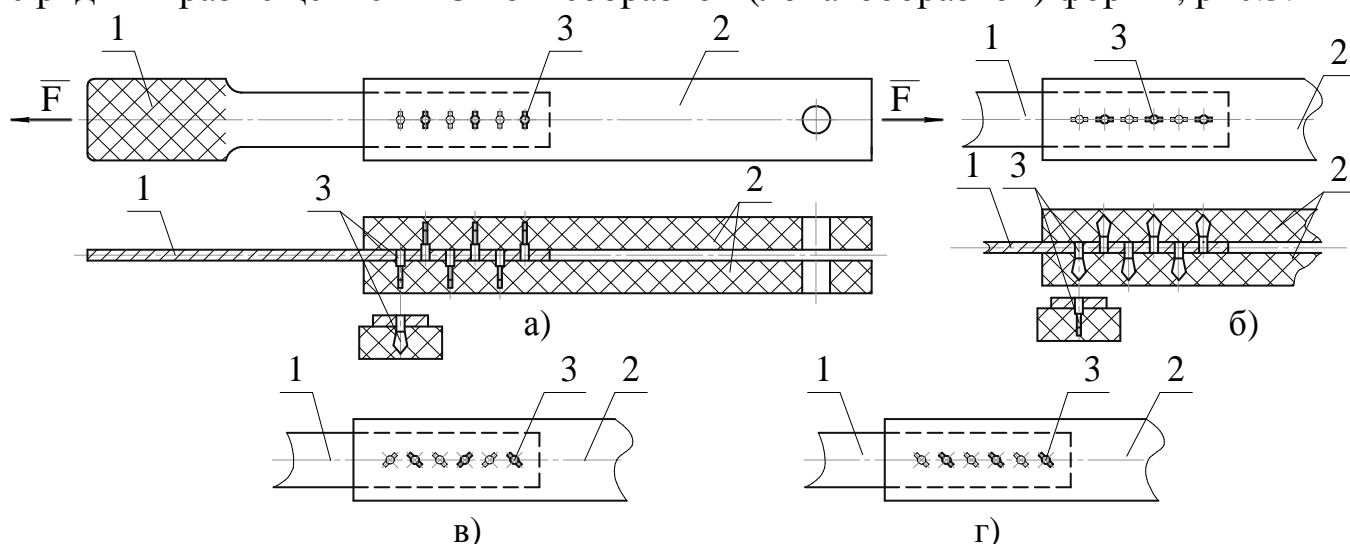


Рисунок 3 – Образцы соединения «сталь-композит»

1 - стальная пластина, 2 - детали из полимерного композиционного материала (ПКМ), 3 - крепежный элемент (КЭ) (плоскости лопаток КЭ под углом к прикладываемой нагрузке F . Нижний ряд КЭ показан тонкой линией)

а) $\alpha = 90^\circ$; б) $\alpha = 0^\circ$; в) $\alpha = \pm 45^\circ$ (поочередно);

г) $\alpha = 45^\circ$, параллельно друг другу.

В ходе эксперимента определялись усилие начала разрушения $F_{ник}$, [Н] и максимальное сдвигающее усилие $F_{сд\ max}$, [Н], выдерживаемое данным соединением.

Установлено следующее:

- при расположении крепежных элементов под углом 45° к сдвигающей силе параллельно друг другу, $F_{ник}$ на 15-40 % выше, чем при расположении КЭ вдоль этой силы или перпендикулярно к ней (для приме-

нения полученных результатов на практике введен коэффициент K_p , значения которого сведены в таблицу 1);

– анализ всех образцов после разрушения, показал, что в начале происходит срез крайнего КЭ.

Таблица 1 – Значения коэффициента K_p

Группа образцов	$F_{тик}, [H]$	K_p
1 группа ($\alpha = 90^\circ$)	12076,8	1,00
2 группа ($\alpha = 0^\circ$)	13872,2	1,15
3 группа ($\alpha = \pm 45^\circ$, поочередно)	13714,7	1,14
4 группа ($\alpha = 45^\circ$, параллельно друг другу)	16946,5	1,40

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 КЭ в конструкции – под углом 45° к сдвигающей нагрузке учитывается коэффициентом K_p (таблица 1).

В пятой главе усовершенствована предложенная методика расчета (7) с учетом полученного уравнения (11), и коэффициента K_p , выполнена проверка ее адекватности на примере соединения типа «пакет», рис. 1б. Расхождение между расчетным значением и экспериментальными данными не превышают 2 %. Вновь разработанный простой и эффективный метод расчета на прочность 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.

В шестой главе приведен пример реализации результатов исследования и их технико-экономическое обоснование.

В качестве объекта восстановления выбран «конфузор» кормоуборочного комбайна ПН-420 «Простор» (комбайн снят с производства, на рынке отсутствуют запасные части). Решением может стать замена поврежденных механическим воздействием или коррозией стальных элементов конструкции на полностью изготовленные в условиях ремонтной мастерской подобные детали на основе новых, более технологичных и менее энергоемких материалов, например, ПКМ.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

– наиболее рациональным конструктивным решением соединения «сталь-композит» из рассмотренных, является соединение КЭ с копьеобразной (лопатообразной) законцовкой «с

Изготовление копии конфузора из ПКМ возможно на основе «мокрого» способа соединения расшлихтованных листов стеклоткани, пропитанных связующим, наложенных на повторяющую внутреннюю объемную модель конфузора, с помощью вакуумной технологии. Изготовление одноразовой модели конфузора основано на заполнении внутреннего объема изношенного конфузора, снятого с комбайна, 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 нового конфузора.

Узел «конфузор – силосопровод» предназначен для передачи потока скошенной и измельченной массы, частицы которой в результате взаимодействия со стенками конструкции приводят к их абразивному изнашиванию. С целью повышения износостойкости внутренней поверхности ремонтного конфузора первый лист, накладываемый на одноразовую модель, предварительно обработанную антиадгезионной смазкой (парафином), пропитывается связующим с добавлением порошка бемита или корунда в соотношении 60 % смолы на 40% мелкодисперсного наполнителя.

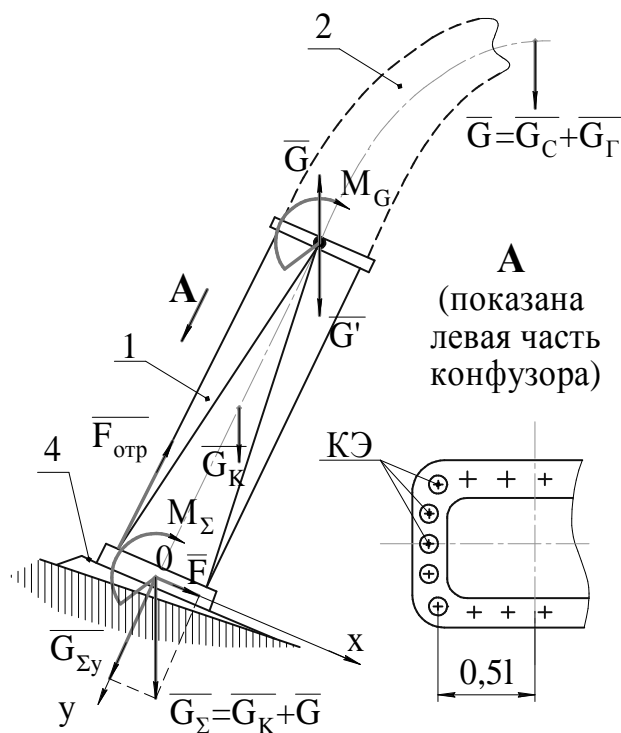


Рисунок 4 – Расчетно-силовая схема конфузора 1, 2 - силосопровод, 3 - поворотное устройство (не показано), 4 - корпус (основание) комбайна

Наиболее сложный вопрос – выполнение соединения нового конфузора 1 со стальными агрегатами комбайна – корпусом 4 и силосопроводом 2 (рис. 4). В работе предлагается сформировать указанные соединения из стальных фланцев, срезанных с изношенного корпуса конфузора и закрепленных на композитном аналоге с помощью вновь разработанного металло-композитного соединения «нахлестка», соединение стальной 4 и композитной 1 частей осуществляется на основе КЭ и эпоксидного клея в «мокром» состоянии.

КЭ изготавливаются из низкоуглеродистой стальной проволоки с помощью слесарных инструментов, а в больших количествах – с помощью холодной

объемной штамповки. Цилиндрические части КЭ обрабатываются эпоксидным клеем и закрепляются по легкопрессовой посадке в отверстиях, просверленных в стальном фланце. Соединение композитного и стального фланцев производится последовательным вдавливанием острых кромок КЭ в «мокрый» композит. 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. С целью сохранения взаимного расположения деталей комбайна относительно друг друга предлагается использовать шаблонно-стапельную сборку (стапель – деревянная рама), широко применяемую в авиации и судоремонтных работах.

КЭ конфузора 1 (рис. 4) в месте его стыка с фланцем, прикрепленным болтами к основанию 4, работают на срез и на отрыв под действием момента от сил тяжести самого конфузора G_K , силопровода G_C и переносимого груза G_T . Разгружающий эффект ферменного подкрепления, управляющего поворотным узлом устройства, в запас можно не учитывать. Суммарный момент $M_\Sigma = M_G + M_{(G'+G_k)}$ у основания конфузора будет создавать силу $F' = M_\Sigma / l$, а сумма всех сил тяжести в проекции на ось x даст срезающую силу $2F$ (учитываются 2 продольных ряда КЭ). В запас можно предположить, что отрывающая сила $F_{omp} = (F' - G_{\Sigma y})$ равномерно распределена по всем КЭ поперечного ряда крепления композитной части конфузора к стальному фланцу, обозначенными знаком \oplus на рис. 4 (вид А). Число таких КЭ z , тогда сила, вырывающая один КЭ:

$$F_{КЭ} = F_{omp} / z. \quad (12)$$

Уточним предложенную математическую модель (7).

$$1. \quad \text{Расчет КЭ на срез:} \quad \tau_{cp} = \frac{KQ_{cp}}{K_p A} \leq \tau_{adm},$$

где Q_{cp} – 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 $0,5zC$).

$$2. \quad \text{Вырыв КЭ из тела ПКМ, под действием } F_{omp}: \quad F_{в\max} < F_{КЭ},$$

где $F_{в\max}$, [Н] – максимальная разрушающая сила, определяется из (11).

$$3. \quad \text{Разрушение адгезионного соединения:} \quad \tau_K = F_K / A_K \leq \tau_{Kadm}$$

где F_K , [Н] – часть силы $2F$, приходящаяся на срез клеевого слоя.

При проектировании тонкостенных агрегатов из ПКМ имеющих прототип, изготовленный из стали ($ст$), можно производить приближенный расчет толщины оболочки по формуле:

$$\delta_{ПКМ} = \delta_{cm} \sqrt{E_{cm} / E_{ПКМ}}. \quad (13)$$

Окончательный вариант конструкции конфузора из ПКМ может быть принят только после проектировочного расчета. Анализ напряженно-деформированного состояния, проведенный методом конечных элементов на базе программного продукта MSC/NASTRAN, показал, что максимальные эквивалентные напряжения в ремонтном конфузоре, отличающемся от своего прототипа, выполненного из металла, только толщиной стенки, возникают по верхнему фланцу, и не превышают 10 МПа, что меньше напряжений разрушения выбранного материала в шесть раз. То есть толщина стенки конфузора из ПКМ может быть назначена согласно результатам приближенного расчета (13).

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 ремонтной мастерской, не требующий высококвалифицированного персонала и дорогостоящего оборудования; предполагаемый экономический эффект от внедрения составляет 120 000 руб.

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 $\sigma_b = 60...70$ МПа, а модуль упругости $E = 10$ ГПа.

3. Обоснована рациональная форма крепежного элемента (КЭ) (штифт с копьобразной 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 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, выдерживающей 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 ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ, В КОТОРЫХ ОТРАЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях

1. 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.

2. 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.

3. Сорокина И.И. Перспективы применения полимерных композитных материалов с добавлением нанокристаллических порошков оксида алюминия в конструировании и ремонте сельскохозяйственной техники / М.В. Астахов, И.И. Сорокина // Труды ГОСНИТИ. – 2012. – Т. 109. – № 1. – С. 9–12.

4. Сорокина И.И. Исследование влияния формы крепежного элемен-

та на прочность соединения «металл-композит» [Электронный ресурс] / И.И. Сорокина, М.В. Астахов // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2012. – № 02. – URL: <http://technomag.edu.ru/doc/308514.html>.

5. Сорокина И.И. 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.

6. 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. 9–16.

7. 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.

8. Сорокина И.И. Возможности применения композитных материалов при модернизации и ремонте сельскохозяйственной техники / М.В. Астахов, И.И. Сорокина // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 118. – С.201–205.

9. Астахов М.В. К расчету на прочность метало - композитных соединений, применяемых при модернизации или ремонте сельскохозяйственной техники / М.В. Астахов, И.И. Сорокина // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т.119. – С. 193-198.

10. Астахов, М.В. Применение неподвижных метало -композитных соединений при модернизации или ремонте сельскохозяйственной техники / М.В. Астахов, И.И. Сорокина // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2015. – № 9. – С. 34–39.

11. Астахов М.В. Об особенностях расчета на прочность дискретного метало-композитного фланцевого соединения / М.В. Астахов, И.И. Сорокина, Е.С. Зуев // Конструкции из композиционных материалов. – 2016. – Вып. 1(141). – С. 12–17.

Просим принять участие в работе диссертационного совета Д 220.010.04 и выслать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева д. 13, ученому секретарю. Телефоны: (473) 224-39-39, 8-900-924-5638, e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Подписано в печать 13.04.2017 г. Формат 60x80^{1/16}. Бумага кн.-журн.

П.л. 1,0. Гарнитура Таймс. Тираж 75 экз. Заказ № 1.

Типография ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ

394087, Воронеж, ул. Мичурина, 1.