

ЖИХАРЕВ Михаил Владиленович

**ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПЛАСТИН ИЗ
КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ УДАРНОМ
ВОЗДЕЙСТВИИ**

01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2019

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

**Научный
руководитель**

Сапожников Сергей Борисович,
доктор технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Брагов Анатолий Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий научно-исследовательской лабораторией
динамических испытаний материалов ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский Нижегородский гос-
ударственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Комаров Валерий Андреевич,
доктор технических наук, профессор,
директор научно-образовательного центра
авиационных конструкций ФГАОУ ВО «Самарский
национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

**Ведущая
организация**

ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технический университет имени А.Н.
Туполева-КАИ»

Защита состоится «21» мая 2019 года в 16-00 на заседании диссертационного со-
вета Д 999.211.02 на базе Пермского национального исследовательского поли-
технического университета и Пермского федерального исследовательского цен-
тра УрО РАН по адресу: 614990, г. Пермь, пр-т Комсомольский, д. 29, ауд. 423 б.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте
ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический
университет» (www.pstu.ru).

Автореферат разослан «5» апреля 2019 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук

А.Г. Щербинин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные высокоэффективные конструкции авиационной и ракетно-космической техники выполнены частично или полностью из волокнистых композитных материалов (угле-, стекло- или органопластиков). Такие конструкции, как правило, являются тонкостенными и нагруженными в своей плоскости в связи с тем, что, наряду с высокой прочностью и жесткостью вдоль направления укладки волокон, они имеют намного меньшие значения трансверсально-сдвиговой прочности.

При эксплуатации композитные конструкции подвергаются случайным локальным ударным нагрузкам по нормали к поверхности, вследствие чего образуются дефекты: расслоения, разрывы волокон, сквозные повреждения. Повреждения в месте удара могут быть почти незаметными под слоем краски или лака и приводить к резкому (до двух раз) снижению прочности при сжатии. Сквозные (баллистические) повреждения могут разрушить высоконагруженную крупногабаритную конструкцию, если она обладает недостаточной конструкционной прочностью и трещиностойкостью.

Для того чтобы такие композитные конструкции в эксплуатации были долговечными и надежными, необходимо уметь прогнозировать последствия случайных ударных воздействий с учетом предварительной нагруженности, а также иметь возможность ремонта (восстановления прочности).

Если для металлических конструкций дефекты от локальных ударов и их последствия уже достаточно глубоко изучены и закладываются в виде дополнительных коэффициентов запаса при проектировании, то для конструкций из композитных материалов этот вопрос является актуальным.

Существует значительное количество работ, посвященных исследованиям процессов деформирования и разрушения композитных конструкций при ударном и квазистатическом нагружении. Известны работы отечественных исследователей: Н.А. Абросимова, А.Н. Аношкина, В.Н. Аптукова, А.М. Брагова, В.Э. Вильдемана, В.А. Комарова, С.Т. Милейко, П.А. Моссаковского, О.Б. Наймарка, Е.Ф. Харченко, Е. А. Чернышова и др. Среди зарубежных исследований следует отметить работы S. Abrate, W. Cantwell, L.M. Bresciani, I.M. Daniel, G.A.O. Davies, M. Grujicic, S. Heimbs, S.S. Morye, N.K. Naik, B. Whittingham и др.

Сложность и многообразие механизмов разрушения композитов, большие деформации, кратковременность протекания процесса удара – все это затрудняет анализ результатов экспериментов, не позволяет выделить отдельные фазы ударного взаимодействия. К этому следует добавить высокую стоимость и трудоемкость баллистических экспериментов.

Поэтому очевидна тенденция к расширению применения метода конечных элементов (пакеты прикладных программ LS-DYNA, ABAQUS, ANSYS и др.). Здесь важно отметить, что центральным вопросом в процессе практического использования МКЭ является вопрос корректного выбора моделей деформирования и разрушения материалов, а также назначения/определения соответствующих параметров выбранных моделей.

Таким образом, разработка численных моделей композитных материалов (с минимальным числом экспериментально определяемых параметров), имеющих необходимые прогностические свойства по оценке баллистической стойкости материала и размеров зон разрушения при различных условиях ударного взаимодействия, а также разработка методики ремонта конструкций с повреждениями – проблемы высокой важности.

Следует заметить, что в качестве объекта исследования в диссертации рассмотрен промышленно выпускаемый высокопрочный композит марки СТЭФ (стеклоткань полотняного переплетения, связующее – эпоксифенольная смола горячего отверждения), который выступает в роли модельного материала, имеющего те же механизмы деформирования и разрушения, что и конструкционные тканевые угле- или органопластики.

Целью диссертационной работы является численное и экспериментальное исследование процессов деформирования, повреждения и разрушения пластин из тканевого композита при ударном и квазистатическом нагружении.

Для достижения указанной цели следует рассмотреть следующие **задачи**:

1. Оценить влияние предварительной нагрузки на баллистическую стойкость композитных пластин из тканевого стеклопластика.

2. Исследовать влияние низко- и высокоскоростных прямых и наклонных ударов на несущую способность композитных пластин из тканевого стеклопластика.

3. Разработать расчетную (численную) мезоструктурную модель тканевого стеклопластика, адекватно описывающую его деформирование и разрушение при ударном нагружении и позволяющую предсказать площадь зоны расслоения.

4. Разработать метод оценки остаточной прочности композитных пластин из тканевого стеклопластика с баллистическими повреждениями.

5. Разработать методику оперативного ремонта матричным компаундом композитных пластин из тканевого стеклопластика с повреждениями после низкоскоростного удара.

Научная новизна представленной работы заключается в следующем:

1. Получены новые экспериментальные данные о влиянии скорости деформирования в диапазоне 0,001...200 1/с на прочностные характеристики тканевого стеклопластика.

2. Получены новые экспериментальные данные о влиянии предварительного нагружения (одноосное растяжение) на баллистические характеристики тканевого стеклопластика.

3. Разработана новая численная мезоструктурная модель тканевого стеклопластика, отличающаяся от существующих моделей введением специального полимерного слоя, определяющего зону расслоения материала.

4. Разработана новая методика оперативного ремонта повреждений типа расслоений, отличающаяся использованием ультразвукового возбудителя для интенсивного разогрева матричного компаунда и заполнения образовавшихся полостей.

Практическая ценность работы. Разработанные численные модели разрушения и деформирования использованы при проектировании защитных кожухов турбовентиляторных двигателей ПАО «ОДК-Сатурн» (г. Рыбинск). Результаты работы были использованы при выполнении гранта Российского научного фонда «Разработка ударостойких композитных материалов и конструкций для плавающих броневых автомобилей» проект № 14-19-00327 и «Разработка новых полимерных волокнистых композитных материалов с управляемой нелинейностью механического поведения и методов проектирования из них элементов турбовентиляторных двигателей», выполняющегося в ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (проект № 18-19-00377/РНФ2018150). Результаты научной работы использованы в практике ремонта композитных конструкций АО ПКФ «Полидор» (г. Челябинск). Результаты диссертационного исследования были использованы предприятием АО «ФОРТ Технологии» (г. Москва) при разработке защищенных транспортных средств.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современного поверенного испытательного оборудования научно-образовательного центра «Экспериментальная механика» ЮУрГУ, выполнением расчетов в лицензионных программных пакетах, установленных на суперкомпьютере «Торнадо-ЮУрГУ», сравнением экспериментальных результатов исследований с результатами численного моделирования и с известными данными других авторов.

На защиту выносятся результаты экспериментальных исследований прочности тканевого композита при растяжении в широком диапазоне скоростей деформирования, результаты экспериментальных исследований прочности композитных пластин при локальном ударе при наличии предварительной нагрузки, численная мезоструктурная модель слоистого композита с дополнительными полимерными слоями, методика оперативного ремонта расслоений.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и региональных конференциях: на международной конференции «European Conference on Composite Materials ECCM16» (Севилья, 22-26 июня 2014), на международной конференции «International Conference on Composite Materials ICCM20» (Копенгаген, 19-24 июля 2015), конференциях аспирантов и докторантов ЮУрГУ (Челябинск, 2014, 2015, 2016).

Полностью диссертация обсуждалась на научных семинарах:

- кафедры «Техническая механика» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета). Руководитель – доктор технических наук, профессор С.Б. Сапожников;
- кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций» Пермского национального исследовательского политехнического университета. Руководитель – доктор технических наук, профессор А.Н. Аношкин.
- института механики сплошной среды Уральского отделения Российской академии наук. Руководитель – доктор физико-математических наук, профессор О.Б. Наймарк.

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении научно-исследовательских работ по грантам Российского научного фонда (проекты № 14-19-00327 и № 18-19-00377) и ряда хозяйственных договоров с промышленными предприятиями.

Публикации. Результаты исследований по теме диссертационной работы отражены в 8 публикациях, включая 5 публикаций в изданиях, индексируемых Scopus [3,4,5,6,8], из которых 2 публикации в изданиях, индексируемых Web of Science [6,8].

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Работа содержит 59 рисунков, 13 таблиц. Общий объем диссертационной работы составляет 125 страниц, список литературы включает 179 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цели и основные задачи работы. Приведены основные результаты, показана их научная новизна и практическая значимость. Дано краткое описание содержания диссертации по главам.

Первая глава посвящена анализу отечественных и зарубежных литературных источников по следующим вопросам:

1. Области применения конструкций из стеклопластика, возможные повреждения при эксплуатации и оценка остаточной прочности конструкции.

Рассмотрены типы конструкций, в которых применяется стеклопластик, а также варианты нагружения этих конструкций и возможные типы повреждений. Рассмотрены методы оценки остаточной прочности после баллистического удара по конструкциям из стеклопластика. Отмечена важность учета предварительного нагружения, так как в момент удара конструкции из композитных материалов находятся под воздействием штатных эксплуатационных квазистатических нагрузок. Однако количество работ по учету предварительного нагружения весьма ограничено. Более того, в ряде работ приводятся противоречивые данные о повышении баллистического предела при наличии предварительного нагружения. Поэтому необходимы дополнительные исследования влияния предварительного нагружения, так как это является важной частью обеспечения эффективной эксплуатации ответственных высоконагруженных транспортных конструкций.

2. Существующие подходы к анализу процессов деформирования и разрушения композитных пластин при низко- и высокоскоростном ударе, методы идентификации параметров расчетных моделей.

Очевидно, что при оптимизации композитных конструкций, подвергающихся ударному локальному нагружению, расчетное получение баллистической кривой (и соответствующего баллистического предела – скорости удара, при превышении которой следует пробой) имеет важное значение, так как прямые эксперименты при оптимизации конструкции, как правило, весьма дороги и продолжительны.

Несмотря на то, что вопросы моделирования композитов при ударе обсуждаются уже на протяжении нескольких последних десятилетий, до сих пор не существует таких моделей, которые можно применить одновременно для описания как высокоскоростного, так и низкоскоростного ударов. В основном занимаются разработкой моделей, в которых описывают либо сквозной пробой пластины (явная динамика), либо моделируют квазистатические процессы при низкоскоростном ударе. При этом, когда повреждения несут пограничный характер (пробой или его отсутствие), а скорость ударника близка к баллистическому пределу, такие модели оказываются малоэффективными. Наблюдаемые механизмы разрушения в реальных материалах эти модели учитывают недостаточно корректно. Поэтому сложно предсказывать, как дальше поведет себя конструкция с такими повреждениями, то есть насколько снизится ее несущая способность.

Кроме того, современные модели разрушения и деформирования, заложенные в коммерческие пакеты прикладных программ конечно-элементного анализа, требуют определения нескольких десятков параметров, методики определения которых не стандартизованы и подчас не могут быть в полном объеме реализованы из-за невозможности изготовления образцов заданной формы с заданным напряженным состоянием.

3. Современные методики ремонта стеклопластиковых конструкций после ударного нагружения.

Когда повреждения сопровождаются разрывом волокон, то одним из самых распространенных способов ремонта является замена поврежденного участка с монтажом заплат. Наряду с этим методом существует болтовой ремонт (заплата крепится к конструкции с помощью болтов), который, как правило, делается для толстых, высоконагруженных слоистых композитов во внутренних конструкциях аэрокосмических аппаратов.

В большинстве случаев локального нагружения повреждения малозаметны и сопровождаются только расслоением. Перечисленные методы ремонта являются нерациональными, так как сопровождаются увеличением толщины и массы изделия, имеют высокую трудоемкость. Поэтому для слабых повреждений, вызванных только расслоением, используют инъекционный ремонт. В нем используют связующее (компаунд) с низкой вязкостью для лучшего проникновения в зоны расслоения. Такой вид ремонта отличается оперативностью и не нарушает целостности изделия, применим для конструкций любой формы и размеров. В основе этого метода лежит заполнение пустот и микротрещин внутри материала матричным компаундом. Иногда в компаунд добавляют наночастицы для увеличения прочностных характеристик. Также следует отметить, что для улучшения проникновения компаунда сверлят небольшие отверстия на некотором удалении друг от друга. Делается это для того, чтобы при закачке компаунда в одно из отверстий, через другое выходил воздух из зоны расслоения. Также компаунд может подаваться в зону расслоения под небольшим давлением.

Однако в литературе нет конкретных рекомендаций по назначению характеристик компаунда (вязкость компаунда и поверхностное натяжение в аспекте капиллярных эффектов) для заполнения расслоений той или иной толщины.

На основании выполненного литературного обзора сформулированы цель и задачи диссертационной работы, отмеченные выше.

Во второй главе приведены экспериментальные исследования стеклопластика при квазистатическом и динамическом растяжении, а также при локальном ударном нагружении. Полученные механические характеристики материала в дальнейшем использованы при построении расчетной модели стеклопластика при ударном нагружении. Кроме того, в данной главе была экспериментально определена остаточная прочность стеклопластика с повреждениями, полученными в результате ударного нагружения. Была проведена оценка влияния предварительного нагружения и наклонных ударов на баллистические свойства стеклопластика.

Экспериментальные исследования механических характеристик стеклопластика при квазистатическом нагружении были проведены на образцах-полосках на универсальной испытательной машине INSTRON 5882. Для получения зависимости предела прочности стеклопластика от скорости деформирования были проведены динамические испытания образцов (рис. 1) на вертикальном башенном копре Instron CEAST 9350. Испытания проводились для скоростей деформирования $\dot{\epsilon}=80$ и 200 сек^{-1} для образцов, вырезанных в направлении основы (0°) и по диагонали (45°).

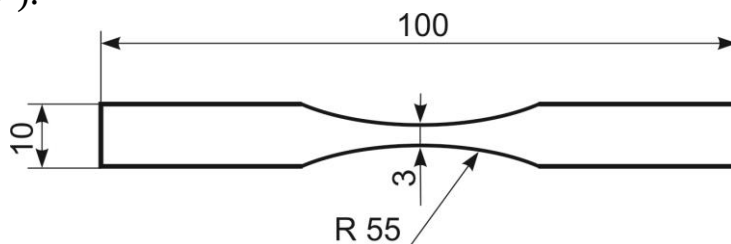


Рис. 1. Форма образцов для динамических испытаний на растяжение

Полученные результаты показали существенную зависимость предела прочности материала от скорости деформирования (рис. 2), что было учтено при назначении свойств материала при численном моделировании.

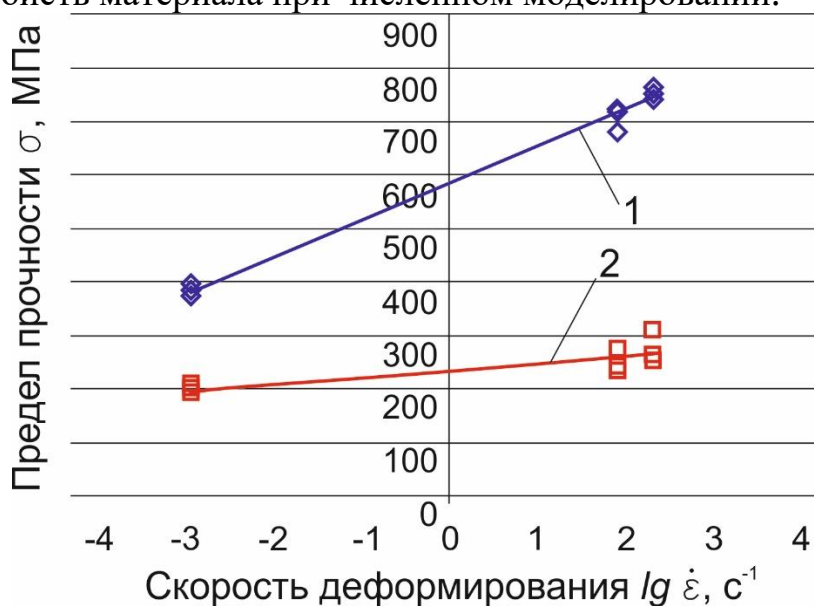


Рис. 2. Зависимость предела прочности от скорости деформирования: кривая 1 – для образцов, вырезанных в направлении нитей основы, кривая 2 – для образцов, вырезанных в диагональном направлении

Для оценки баллистических свойств материала были проведены испытания на баллистическом стенде (рис. 3), позволяющем фиксировать начальную и остаточную (после пробоя) скорости индентора. Баллистические испытания проводились в соответствии со стандартом ГОСТ Р 50744-95 стальным шариком диаметром 6,35 мм и массой 1,05 грамма.



Рис. 3. Баллистический стенд

Для баллистических испытаний были подготовлены композитные пластины размерами 100×100 мм из стеклопластика с толщинами 1,95 и 3,90 мм. Обработка экспериментальных данных по удару имитатором осколка проведена с использованием эмпирической зависимости Ламберта-Джонаса:

$$V_r = \begin{cases} 0 & \text{если } V_i < V_L \\ A \cdot (V_i^m - V_L^m)^{1/m} & \text{если } V_i \geq V_L \end{cases}, \quad (1)$$

где A , V_L и m – три параметра регрессии. V_r и V_i – остаточная и начальная скорости снаряда, соответственно, V_L – баллистический предел (скорость, при превышении которой наблюдается пробой). После обработки данных были получены баллистические кривые (рис. 4) и оценены баллистические пределы: 185 и 302 м/с для толщин 1,95 и 3,90 мм соответственно.

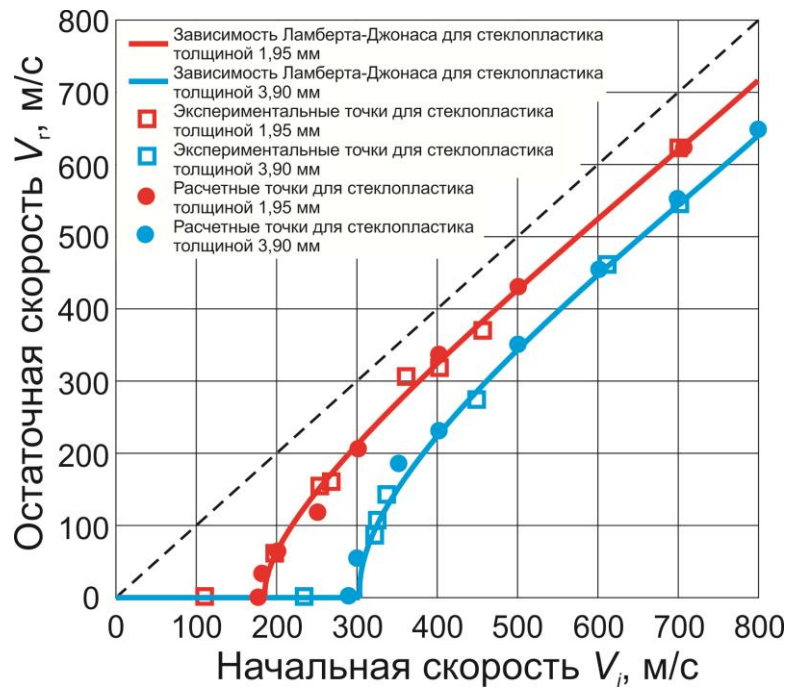


Рис. 4. Баллистические кривые

При разрушении в композитных панелях происходил разрыв волокон с образованием расслоений. При этом размер области расслоения зависит от начальной скорости ударника. Наибольшая зона повреждений образуется при скорости, близкой к баллистическому пределу (рис. 5). Это связано с тем, что в этом случае образец поглощает всю кинетическую энергию от ударного воздействия за счет образования новых поверхностей (расслоений) и трещин внутри слоёв.

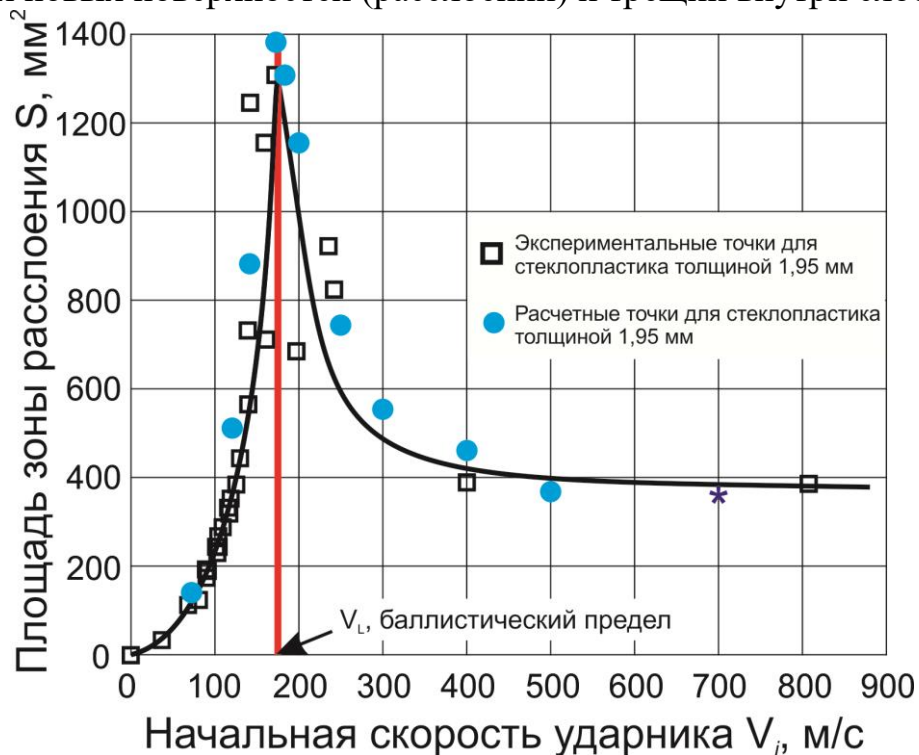


Рис. 5. Зависимость площади зоны расслоения от начальной скорости ударника V_0 для стеклопластика толщиной 1,95 мм

Для оценки влияния полученных повреждений на прочностные характеристики стеклопластика были проведены эксперименты по определению остаточной прочности образцов-полосок (200x40x1,95 мм) на квазистатическое растяжение.

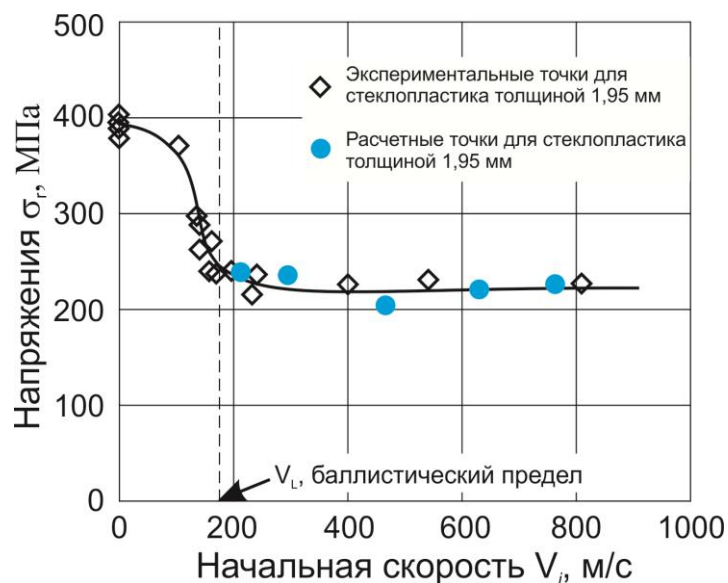


Рис. 6. Зависимость остаточной прочности от начальной скорости ударника

Форма зависимости на рис. 6 объясняется тем, что при скоростях близких к баллистическому пределу, помимо увеличения зоны расслоения, наблюдается рост числа разрушенных волокон, что приводит к падению прочности пластины. При скоростях выше баллистического предела (выше 185 м/с) происходит сквозной пробой с разрушением всех волокон, контактировавших с индентором при минимальных значениях площади зоны расслоения (аналог – отверстие в пластине, полученное сверлением).

В результате для образцов из стеклопластика с повреждениями остаточная прочность при растяжении снижается в зависимости от начальной скорости и размера зоны расслоения с 380 МПа до ~ 210 МПа. Это значит, что, закладывая коэффициент запаса около 2,0, можно не опасаться разрушения конструкции при однократном нагружении.

Поскольку конструкции из композитных материалов максимально эффективно работают при растяжении, были проведены испытания по оценке влияния предварительного одноосного *растягивающего* усилия на баллистические свойства стеклопластика. Образец помещали в захваты испытательной машины и задавали требуемую растягивающую нагрузку, после чего по образцу производился выстрел. Испытания были проведены для пяти различных уровней предварительного нагружения: 80, 120, 160, 200 и 240 МПа (предел прочности σ_b составлял 380 МПа).

Как показали результаты баллистических испытаний, баллистический предел материала медленно снижается с ростом величины предварительного нагружения (рис. 7).

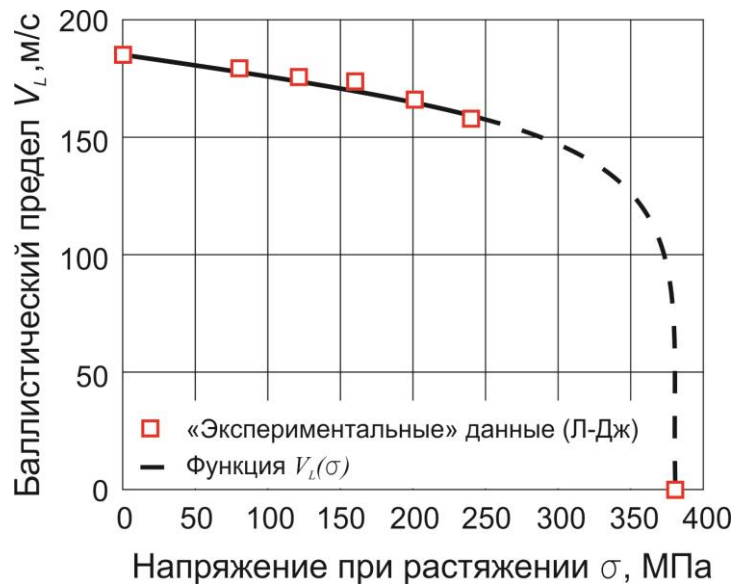


Рис. 7. Зависимость баллистического предела от величины предварительного нагружения для стеклопластика толщиной 1,95 мм

Предложена аппроксимирующая функция, описывающая экспериментальные данные:

$$V_L(\sigma) = V_{L0} \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_b}\right)^n, \quad (2)$$

где $n = 0,15$, $V_{L0} = 185$ м/с – баллистический предел материала без предварительной нагрузки. Вид этой функция основан на предположении, что при нагрузке, близкой к пределу прочности, достаточно незначительной энергии индентора, чтобы пробить образец.

Интересно отметить, что в транспортном машиностроении для работы механизмов в квазистатических условиях закладывается коэффициент запаса прочности около 2. При этих условиях снижению баллистического предела произойдет не более чем на 15% в сравнении с ненагруженными элементами. В авиационной и ракетной технике запасы прочности ниже, поэтому снижение баллистического предела может оказаться заметно сильнее.

В дополнение к нормальным ударам на образцах 100x100 мм экспериментально изучено сопротивление стеклопластика ударам под углами 15, 30, 45 и 60 градусов к нормали.

Получена зависимость баллистического предела от угла наклона, показывающая, что отклонения до 30° от нормали практически не влияют на баллистический предел (~300 м/с). Только при больших отклонениях баллистический предел начинает резко возрастать, достигая величины 378 м/с для угла 60° (толщина материала 3,90 мм). Таким образом, самым опасным случаем удара по стеклопластику СТЭФ с точки зрения минимума баллистического предела можно считать удар по нормали.

Третья глава посвящена расчетным исследованиям прочности стеклопластика при статических (первая часть) и ударных воздействиях (вторая часть).

Проведена оценка прочности композита с концентратором напряжений (отверстие) при растяжении и численное моделирование баллистического удара по нормали к стеклопластиковой пластине в пакете LS-DYNA v.971.

Как было отмечено ранее, повреждения, возникающие в результате ударного нагружения, существенно снижают предел прочности стеклопластика. Для оценки остаточной прочности после ударного нагружения было предложено заменять зону повреждения эквивалентным отверстием, снижающим локальную жесткость материала также, как и реальное повреждение. Далее следует проводить оценку прочности композита с отверстием по критерию, в котором учтена нелинейность диаграмм деформирования композита с использованием энергетических соображений типа Г. Нейбера¹ (поиск напряжений и деформаций на нелинейном участке диаграммы « $\sigma - \epsilon$ » по известному упругому решению с использованием гиперболы $\sigma\epsilon = \text{const}$, рис. 8). На гиперболе все точки имеют одинаковую удельную энергию деформирования $\sigma\epsilon$.

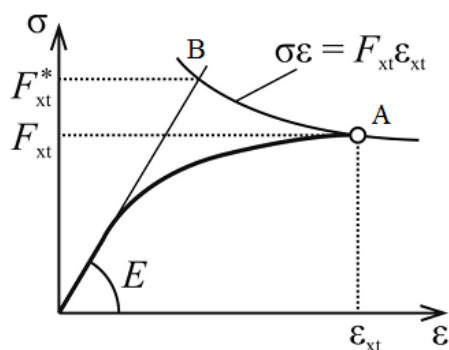


Рис. 8. Гипербола Г. Нейбера при неупругом анализе напряжений у концентраторов

Напряжения разрушения σ_{cr} можно определить по формуле:

$$\sigma_{cr} = F_{xt}^* / \alpha_s \quad (3)$$

где F_{xt}^* – эффективный предел прочности, α_s – коэффициент концентрации осредненных на заданной базе (~ 1 мм) напряжений, который находится расчетным путем в программе ANSYS для образца из анизотропного упругого материала с эквивалентным отверстием. Сравнение экспериментальных и расчетных разрушающих напряжений (рис. 6) показало, что погрешность расчетов критических напряжений разрушения не превышает 10%.

Во второй части была разработана численная мезоструктурная модель стеклопластика при локальном ударе сферическим индентором в конечно-элементном пакете LS-DYNA. В геометрическом аспекте модель представляла собой стеклонити, внутри- и межслойный полимеры – три разных компонента с существенно отличными свойствами. Нити были представлены в виде SHELL-элементов (оболочки), а матрица – в виде Solid-элементов (твердотельные). Такое представление позволило адекватно моделировать расслоение композита и внутрислойное разрушение стеклонитей и матрицы. Оболочечные и твердотельные элементы имели общие узлы, что позволило отказаться от использования настраиваемых разрушаемых контактов и снизить размерность задачи.

¹ Sapozhnikov S.B., Cheremnykh S.I. The strength of fibre reinforced polymer under a complex loading // Journal of Composite Materials, 47 (20-21), 2013, pp. 2525-2552.

В трехмерной мезомодели нити были изогнутыми, с возможностью распрямляться, растягиваться и отрываться от матрицы при деформировании. Материал становится менее жестким, а волокна выпрямляются быстрее. Все эти эффекты приводят к локализации повреждений в зоне удара. В литературе тканевые композиты зачастую моделируются только анизотропными Solid-элементами, упругая ударная волна проходит через материал вплоть до свободных границ пластины, не разрушая матрицу. Это нарушает физическую суть процессов, происходящих в тканевых композитах во время ударного нагружения. Таким образом, в данной работе предлагается несколько усложнить геометрическую сторону задачи, подробно смоделировав мезоструктуру материала, при этом кардинально упростив модель деформирования и разрушения компонентов – волокон и матрицы.

Для учета анизотропии тканевого композита (с низкими внутри- и межслойными сдвиговыми характеристиками), каждая основная и уточная нити была представлены в виде двух параллельных изогнутых полосок (изотропные Shell-элементы). Для того чтобы массовая доля волокон осталась прежней, была пропорционально увеличена их толщина. На первом этапе была создана представительная ячейка (рис. 9), которая далее была размножена до полноразмерной модели (рис. 10).

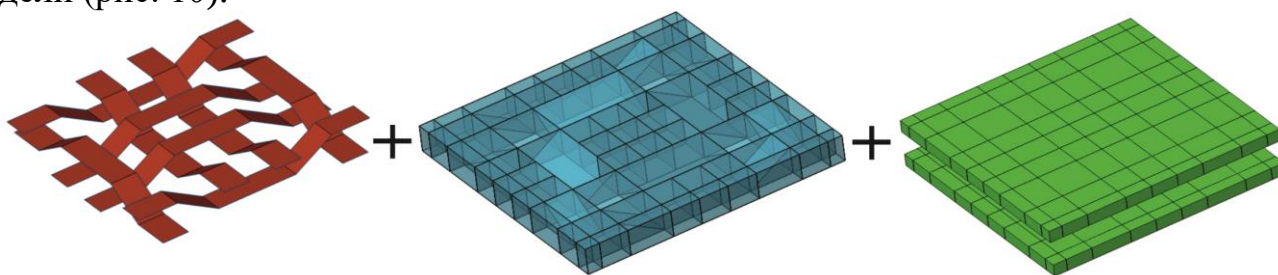


Рис. 9. Представительная ячейка стеклопластика: нити отмечены красным, внутрислойная матрица – синим цветом, а межслойная матрица – зеленым цветом

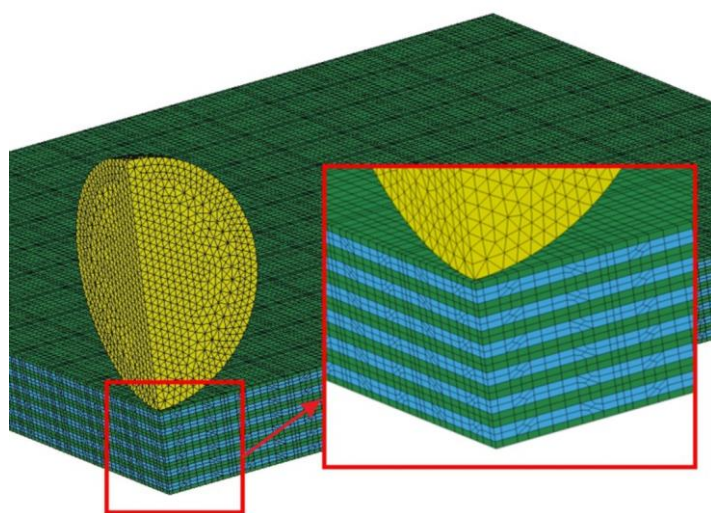


Рис. 10. Мезоструктурная модель стеклопластика

Материал MAT-ELASTIC был выбран для нитей и для матрицы с характеристиками, показанными в Таблице 1.

Таблица 1

Параметры материалов, используемых в модели

Часть	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	σ_b^* , МПа
Нити	2500	70	0,26	3500
Межслойная матрица	600	2	0,4	100
Внутрислойная матрица	600	2	0,4	300
Ударник	7800	200	0,3	—

* - варьируемый параметр модели

В данной модели была использована команда MAT-ADD-EROSION, которая позволяет удалять элементы из расчета, если происходит превышение величины выбранного критерия разрушения. В модели критерием разрушения являлось превышение первым главным напряжением $\max \sigma_1$ предельного значения σ_b . Значения σ_b для разных материалов модели показаны в Таблице 1.

Имея максимальный предел прочности при динамических испытаниях в направлении основы, равный 750 МПа, двухосную укладку волокон в ткани, а также объемную долю волокон (~50%) в нити основы или утка (однонаправленный микропластик), значение σ_b для нитей принято равным 3500 МПа, что хорошо согласуется с известными литературными данными для S-стекла. Корректность этих простых оценок оправдана тем, что при динамическом нагружении ползучесть матрицы мала и волокна в стеклопластике не успевают распрямиться, работают как в композите с прямыми волокнами в пакете [0/90]. В квазистатических условиях нити стараются распрямиться, разгибаются, и за счет этого прочность нитей и стеклопластика в целом снижается. Механические свойства *межслойной* матрицы, заложенные в модель, приняты соответствующими характеристикам объемных эпоксидных смол из литературных источников (предел прочности ~100 МПа). *Внутрислойная* матрица была искусственно выделена из нитей в Solid-элементы модели и по этой причине ей назначен более высокий предел прочности (300 МПа), так как в стеклопластике она существует в виде тонких пленок между волокнами и не имеет развитой трехмерной молекулярной структуры. Этот параметр был найден в процессе сопоставления расчетных и экспериментальных площадей расслоения (микроповреждения) при ударе индентором с высокой скоростью (звездочка на рис.5). Расчеты с меньшими скоростями удара дали площади расслоений, отмеченные на рис.5 кружками.

Результаты расчетов также показали, что разработанная численная модель позволяет предсказывать остаточную скорость ударника (описывать всю баллистическую кривую) и величину баллистического предела с погрешностями, не превышающими 15 м/с (рис. 4, кружки). Полученные размеры зоны разрушения в модели удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными (рис. 11, рис.5).

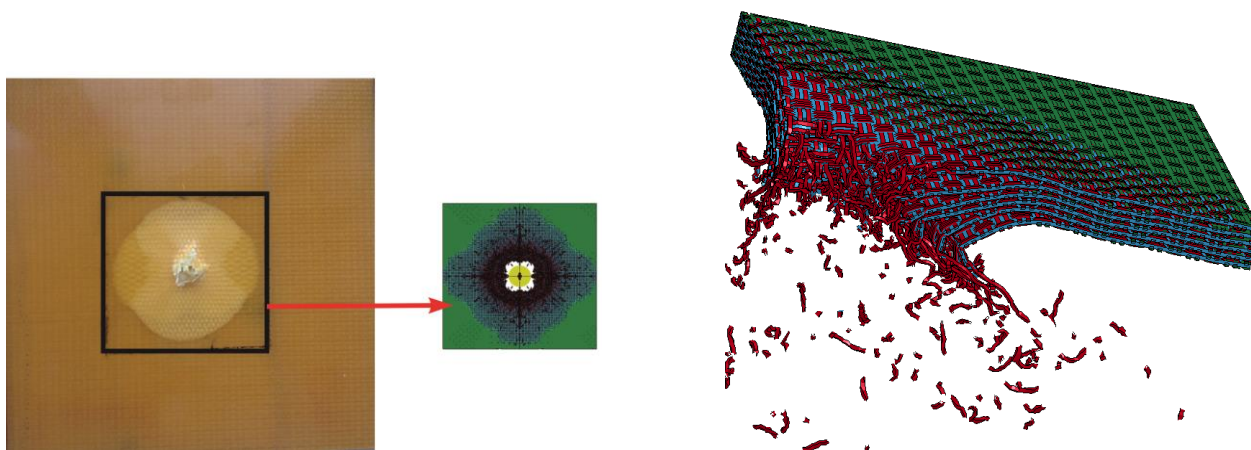


Рис. 11. Экспериментальная (слева) и расчетная (справа) картины разрушения панели из стеклопластика толщиной 1,95 мм при скорости ударника 504 м/с

Четвертая глава посвящена разработке методики ремонта матричными компаундами поврежденных (расслоения) пластин и исследованию реологических свойств матричных компаундов.

Предложен оперативный метод ремонта расслоений. Для этого используется жидкий матричный компаунд на основе эпоксидной смолы ЭД-20 с отвердителем и ультразвуковой возбуждатель (рис. 12), помогающий вязкой матрице разогреться и проникнуть в трещины и расслоения через сквозные отверстия малого диаметра, предварительно выполненные в зоне расслоения.



Рис. 12. Ультразвуковой возбуждатель в работе

Для обеспечения полного заполнения трещин расслоения полимерным компаундом были изучены факторы, влияющие на реологические свойства матрицы на основе смолы ЭД-20 (вязкость компаунда и поверхностное натяжение на поверхности стекла в аспекте капиллярных эффектов), а также было изучено изменение этих свойств при изменении температуры. Были получены зависимости изменения краевого угла смачивания θ , поверхностного натяжения Σ матричного компаунда и его вязкости от температуры.

На основании проведенных экспериментов можно сделать выводы о существенном изменении поверхностного натяжения, вязкости и краевого угла от

температуры для компаунда на основе эпоксидной смолы и отвердителя. С увеличением температуры снижается вязкость, что значительно увеличивает скорость пропитки и заполнения компаундом микротрещин. Однако при высоких температурах ускоряется процесс полимеризации компаунда, поэтому разогрев компаунда до температур выше 70 °С является нецелесообразным.

Далее была найдена зависимость высоты подъема столба жидкости в капилляре от времени (рис.13), используя уравнение для скорости пропитки жидкостью капилляра:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{r^2 \cdot \rho \cdot g}{8 \cdot \eta(t) \cdot l} \cdot (l_{max} - l) \quad (4)$$

где $\eta(t)$ является зависимостью вязкости от времени; r – радиус капилляра, эквивалентный ширине трещины; l_{max} – критическая высота подъема столба жидкости в капилляре; l – длина заполненного жидкостью участка капилляра в момент времени t .

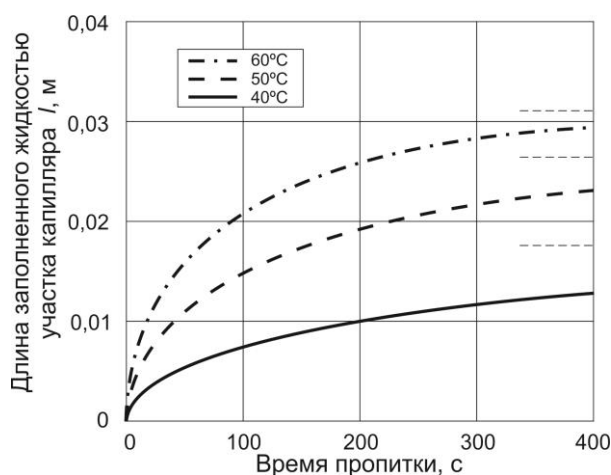


Рис. 13. Зависимость высоты подъема столба жидкости в капилляре от времени

Экспериментально было обнаружено, что ультразвуковой возбудитель (мощность 600 Вт, частота 18 КГц), используемый в данной работе, разогревает матричный компаунд в зоне контакта с поверхностью до температур порядка 55-60 °С. При этих температурах вязкость компаунда в течение ~7 минут остается практически постоянной, затем начинает быстро расти. В эксперименте было проведено сравнение реологических параметров компаунда для трех различных температур. Результаты данного сравнения приведены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики матричного компаунда

Температура T , °С	Краевой угол θ , град.	Поверхностное натяжение Σ , мН/м	Зависимость вязкости η от времени t , Па·с	Время подъема t , с.	Длина заполненного жидкостью участка капилляра l , мм
60	12,4	95	$0,386e^{0,0058t}$	400	29,8
50	17,7	102	$0,915e^{0,0036t}$	400	23,3
40	23,9	112	$4,20e^{0,0019t}$	400	13,0

Эти результаты показывают, что качественная пропитка (наибольшая высота столба за 400 секунд) достигается при температуре $\sim 60^{\circ}\text{C}$. Эта температура эпоксидного компаунда признана нами наилучшей для ремонта микротрещин и расслоений данным методом. Отсюда также следует, что расстояние между отверстиями малого диаметра должно быть не более 29,8 мм (рис.14).

Далее для полной полимеризации матрицы предлагается использовать местный инфракрасный нагреватель. В результате проведенных экспериментов было отмечено восстановление прочностных свойств стеклопластика после ремонта до 80-90% от неповрежденного.

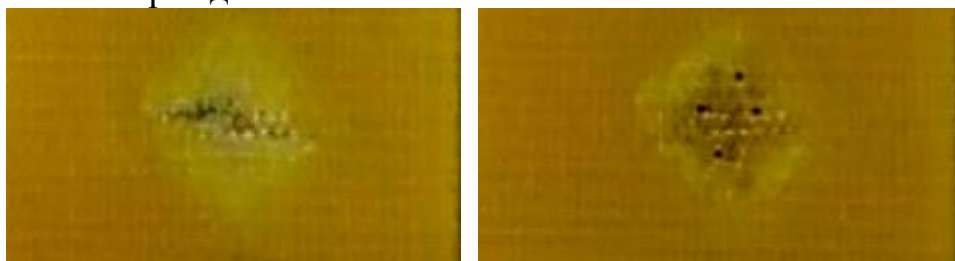


Рис. 14. Образец до ремонта (слева) и после ремонта (справа), видны отверстия и темная зона пропитки

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Проведены исследования по оценке влияния предварительного нагружения на баллистические характеристики стеклопластика СТЭФ. Баллистический предел уменьшается на 15% при величине предварительной нагрузки равной 50% от предела прочности материала.
2. Проведены исследования по оценке влияния наклонных ударов на баллистические характеристики стеклопластика СТЭФ. Обнаружено, что самым опасным случаем удара по стеклопластику СТЭФ можно считать удар по нормали.
3. Разработана новая расчетная мезоструктурная модель стеклопластика СТЭФ, отличающаяся явным учетом геометрической структуры материала и численной эффективностью за счет комбинации твердотельных и оболочечных элементов, имеющих общие узлы, а также введением специального полимерного слоя, определяющего зону расслоения материала. Данная модель позволяет предсказывать остаточную скорость ударника (описывать всю баллистическую кривую) и величину баллистического предела с погрешностями, не превышающими 15 м/с. Полученные размеры зоны разрушения в модели удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.
4. Разработана методика по оценке остаточной прочности стеклопластика после баллистических повреждений, основанная на замене зоны повреждения эквивалентным отверстием и применением экспресс-метода.
5. Разработана методика ремонта небольших повреждений типа расслоений путем заполнения трещин компаундом с помощью ультразвукового возбуждителя, разогревающего компаунд до температур $\sim 60^{\circ}\text{C}$ и повышающего его текучесть.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Sapozhnikov S.B., Zhikharev M.V. Ballistic damage, residual strength and repair of GFRP plates // Proceedings of International Conference for Advanced Marine Engineering (ICACME 2013), September 10-12 2013, Beijing, China.
2. Сапожников С.Б., Жихарев М.В. Типы повреждений тканевого стеклопластика и ремонт расслоений после низкоскоростного удара // Композиты и наноструктуры, г. Москва. – 2014. – Т. 6. – № 3. – С. 68-75. (БАК).
3. Sapozhnikov S.B., Zhikharev M.V. Impact damages and healing of GFRP sandwich skin // Proceedings of ECCM16 - 16th European conference on composite materials, June 22-26 2014, Seville, Spain. (Scopus).
4. Zhikharev M.V., Vaulin S.D., Sapozhnikov S.B. Delaminations and ultrasound assisted repair of ballistically loaded GFRP // Proceedings of ICCM20 - 20th International conference on composite materials, July 19-24 2015, Copenhagen, Denmark. (Scopus).
5. Жихарев М.В., Сапожников С.Б. Баллистические повреждения слоистого стеклопластика и их ремонт методом ультразвуковой пропитки матричным компаундом // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 4. – С. 94-109. (БАК, Scopus).
6. Zhikharev M.V., Sapozhnikov S.B. Two-scale modeling of high-velocity fragment GFRP penetration for assessment of ballistic limit // International Journal of Impact Engineering. – 2017. – Vol. 101. – P. 42-48. (Scopus, WoS).
7. Жихарев М.В. Влияние предварительного нагружения на баллистические свойства стеклопластиковых панелей // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2017. – Т.17. – №4. – С. 89-90. (БАК).
8. Zhikharev M.V., Sapozhnikov S.B., Kudryavtsev O.A., Zhikharev V.M. Effect of tensile preloading on the ballistic properties of GFRP // Composites Part B:Engineering. (Scopus, WoS). (в печати)

Формат 60×90/16. Набор компьютерный.
Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии «Активист».
Адрес: 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, 74б.
Тел. +7(351) 238-01-02