



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2015

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.06

УДК 532.6, 539.422

БАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ СЛОИСТОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА И ИХ РЕМОНТ МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРОПИТКИ МАТРИЧНЫМ КОМПАУНДОМ

М.В. Жихарев, С.Б. Сапожников

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 16 июля 2015 г.
Принята: 13 октября 2015 г.
Опубликована: 25 декабря 2015 г.

Ключевые слова:

ремонт, ультразвуковой разогрев, баллистический удар, расслоение, остаточная прочность, капиллярные эффекты

АННОТАЦИЯ

Изучение характера повреждения проводили на примере пластины из стеклопластика СТЭФ (матрица – эпоксидная смола, наполнитель – стеклоткань плотнотно-го переплетения, шесть слоев), который подвергали обстрелу на специально разработанном разгонном стенде. Эксперименты по пробое пластин были проведены стальным сферическим ударником диаметром 6 мм (масса 1,05 г) с начальными скоростями 50–900 м/с. Обработка экспериментальных данных по удару имитатором осколка проведена с использованием эмпирической зависимости Ламберта и показала величину баллистического предела ~ 180 м/с. На основании проведенных экспериментов получена зависимость площади зоны расслоения в образце от начальной скорости ударника V_0 . Наибольшая площадь повреждений образуется при скоростях, близких к баллистическому пределу. Это связано с тем, что при таких скоростях образец поглощает всю кинетическую энергию ударника за счет расслоения. Обнаружено, что в месте удара ширина раскрытия трещины расслоения достигает максимальной величины 50 мкм. Для определения остаточной прочности были проведены испытания на растяжение на испытательной машине INSTRON образцов с повреждениями после баллистических испытаний. На основании проведенных экспериментов предложено заменять зону повреждения эквивалентным отверстием. При произвольном напряженном состоянии оценка остаточной прочности композита с концентратором напряжений производится приближенным экспресс-методом, основанным на энергетическом подходе. Таким образом, определяя размер зоны повреждения и диаметр эквивалентного отверстия, можно предсказывать остаточную прочность элемента конструкции. Так как даже небольшие повреждения существенно снижают нагрузку разрушения образцов, разработан эффективный метод ремонта расслоений. Ремонт происходит путем заполнения пустот между слоями стеклоткани матричным компаундом на основе эпоксидной смолы. Эпоксидная смола связывает слои между собой, что обеспечивает их дальнейшую совместную работу. Изучены факторы, влияющие на реологические свойства матрицы (вязкость эпоксидного компаунда и поверхностное натяжение в аспекте капиллярных эффектов). Было показано, что ультразвуковой разогрев матрицы до температуры 60 °С позволяет полностью заполнить отмеченные выше трещины расслоения длиной до 20 мм за 90 секунд. В результате использования данного метода прочность образца после ремонта составляет 80–90 % от исходного неповрежденного.

© ПНИПУ

© Жихарев Михаил Владиленович – аспирант, e-mail: zhi-misha@yandex.ru
Сапожников Сергей Борисович – доктор технических наук, профессор, e-mail: ssb@susu.ac.ru

Mikhail V. Zhikharev – Doctoral Student, e-mail: zhi-misha@yandex.ru
Sergei B. Sapozhnikov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: ssb@susu.ac.ru

BALLISTIC DAMAGES OF GFRP AND THEIR REPAIRS USING ULTRASOUND MATRIX IMPREGNATION

M.V. Zhikharev, S.B. Sapozhnikov

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 16 July 2015
Accepted: 13 October 2015
Published: 25 December 2015

Keywords:

repair, ultrasound heating, ballistic impact, delamination, residual strength, capillary effects

ABSTRACT

The research of type of damages was carried out using the GFRP plates made of STEF (matrix – epoxy resin, filler – plain weave glass fibre fabric, six layers, 2 mm of thickness), which were fired at the special stand. Experiments were conducted with steel spherical impactors, 6.35 mm diameter (weight of 1.05 g) with terminal velocity 50–900 m/s. Experimental data of ballistic curves was fitted by least-square regression according to the classical Lambert-Jonas equation. According to this data, the perforation begins with velocity ~180 m/s (ballistic limit V_{50}). The dependence of delamination area vs. initial velocity V_0 was obtained as results of experimental data optical processing. The maximum delamination area is formed when the velocity is close to the ballistic limit. The main reason of it is that the specimens absorb all the kinetic energy of the impactor at this velocity. It was found that at the impact point the maximum of interlayer crack gaps (delamination thickness) reaches ~50 microns. The tests provided on tensile specimens with ballistic damages were performed at INSTRON testing machine to determine the residual strength with such defects. On the basis of the experiments we propose to replace the damaged area by an open hole with the equivalent diameter. For an arbitrary loading the evaluation of residual strength was made by the express-method based on the energy approach. Thus, determining the size of the damaged area and the equivalent diameter holes, we can predict the residual strength of the structural element with a defect. Due to the fact that small damages significantly reduce the fracture load of specimens, an effective method of repairing delamination was developed. The repair occurs by filling the cracks between the layers using the epoxy resin compound. Epoxy resin links the layers together that provides their further joint work. The factors influencing the rheological properties of the matrix (epoxy compound viscosity and surface tension in terms of capillary effects) were studied. It was shown that a matrix ultrasound heating up to the temperature of 60 °C allows a complete filling of the above-mentioned crack of delamination at the length up to 20 mm for 90 seconds. Further, for complete matrix curing we used the local infrared heater. As a result of the repair, GFRP strength properties run up to 80–90 % of the initial undamaged one.

© PNRPU

Введение

При эксплуатации композитных конструкций, например, в авиации можно выделить два случая, когда образуются дефекты несущих поверхностей: повреждения во время наземной эксплуатации (удары падающим инструментом при обслуживании и т.п. – низкоскоростной удар) и случайные повреждения во время полетов (кусочки бетонной крошки из-под переднего колеса при взлете со взлетно-посадочной полосы, осколки снарядов и пуль в боевых ситуациях – высокоскоростной удар). Если крупные повреждения при наземной эксплуатации или усталостные трещины обнаруживаются в процессе осмотра и далее производится ремонт, то последствия падения инструмента или града на тонкостенные конструкции могут быть снаружи практически незаметными, а снижение прочности конструкции может оказаться значительным [1].

Высокоскоростной удар композитных пластин сопровождается сквозным проникновением ударника с образованием отверстия округлой формы, тогда как при низкоскоростном ударе основным результатом является расслоение [1–3]. Зона расслоения может быть значительной и существенно снижать остаточную прочность [4–6]. Отсюда следует, что расслоения необходимо залечивать, поэтому применяют различные способы замены поврежденного участка с монтажом заплаток [7, 8]. В работе [8] производится сравнение

целого, поврежденного и отремонтированного участков лопасти путем конечно-элементного моделирования.

Наряду с монтажом заплаток существуют такие методы ремонта, как поверхностный ремонт, инъекционный ремонт и болтовой ремонт [9]. Простой поверхностный ремонт проводят при неструктурных повреждениях (царапинах, небольших выбоинах, вмятинах) путем заделки шпаклевкой с последующим ошкуриванием и покраской. Болтовой ремонт (заплата крепится к конструкции с помощью болтов), как правило, производится для толстых, сильно нагруженных слоистых композитов [10]. Такой способ ремонта нельзя считать рациональным, так как он сопровождается увеличением толщины и массы изделия, имеет высокую трудоемкость и большие временные затраты. Поэтому для небольших повреждений, вызывающих только расслоение, используют инъекционный ремонт. В инъекционном ремонте используют компаунд с низкой вязкостью для лучшего проникновения в зоны расслоения [11, 12]. Такой вид ремонта отличается своей оперативностью и не нарушает целостности изделия, применим для конструкций любой формы и размеров.

В основе этого метода лежит заполнение пустот и микротрещин внутри материала, возникающих в результате расслаивания после низкоскоростного удара, связующим (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 подается в зону расслоения под небольшим давлением.

Так, в работе [10] авторы рассматривают введение в зону расслоения смолы с 3 % содержанием органо-металлического катализатора отверждения, который представляет собой связь углерода и металла (литий, магний, цинк). Перед ремонтом сверлится отверстие в центре зоны повреждения и 6 равномерно расположенных вентиляционных отверстий по краям зоны расслоения.

Сверление отверстий может нанести дополнительный ущерб и необходимо иметь определенный опыт для проведения таких операций [12]. Так же сложно оценить, насколько успешны такие операции без применения методов неразрушающего контроля и постремонтных испытаний.

Для полного заполнения компаундом микротрещин шириной в десятки микрометров необходимо иметь весьма низкую вязкость компаунда при условии смачивания ею поверхности композита. Очевидно, что небольшие трещины можно рассматривать как капилляры, а явления, возникающие в трещинах при заполнении их компаундом, – как капиллярные.

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных ремонту, отсутствуют обобщающие рекомендации по ремонту повреждений после удара при скоростях, меньших баллистического предела (BVI), а именно расслоений. В предыдущей работе [13] авторами было предложено использовать инфракрасную камеру для обнаружения повреждений и метод экономного ремонта расслоений в композитных конструкциях после BVI, основанный на использовании ультразвукового возбуждителя (частота 18 кГц, мощность 600 Вт) для разогрева полимерного компаунда в зоне расслоения. В процессе работы вибровозбудитель нагревает компаунд, повышая его текучесть, и тем самым улучшает его проникновение в зоны расслоения.

Однако эти исследования были частными и не учитывали целый ряд моментов, таких как характер повреждения, размер зоны повреждения, факторы, влияющие на реологические свойства матрицы (вязкость эпоксидного компаунда и поверхностное натяжение

в аспекте капиллярных эффектов). Также не были экспериментально определены эти параметры и влияние на них температуры. В этой работе акцент сделан на исследовании реологических свойств компаунда – эпоксидная смола ЭД-20 и отвердитель полиэтиленполиамин (ПЭПА), 100:10 (по массе).

1. Баллистические испытания

Для изучения характера повреждения пластины из стеклопластика СТЭФ [14] (матрица – эпоксидная смола, наполнитель – стеклоткань полотняного переплетения, шесть слоев) подвергались обстрелу на специально разработанном разгонном стенде [15]. Эксперименты по пробое пластины проводили с начальными скоростями 50–900 м/с стальным сферическим ударником диаметром 6,35 мм (масса 1,13 г). Обработка экспериментальных данных по удару имитатором осколка была проведена с использованием эмпирической зависимости Ламберта [16]. На рис. 1 представлена баллистическая кривая, из которой следует, что пробивание начинается со скоростей ~180 м/с (баллистический предел V_{50}).

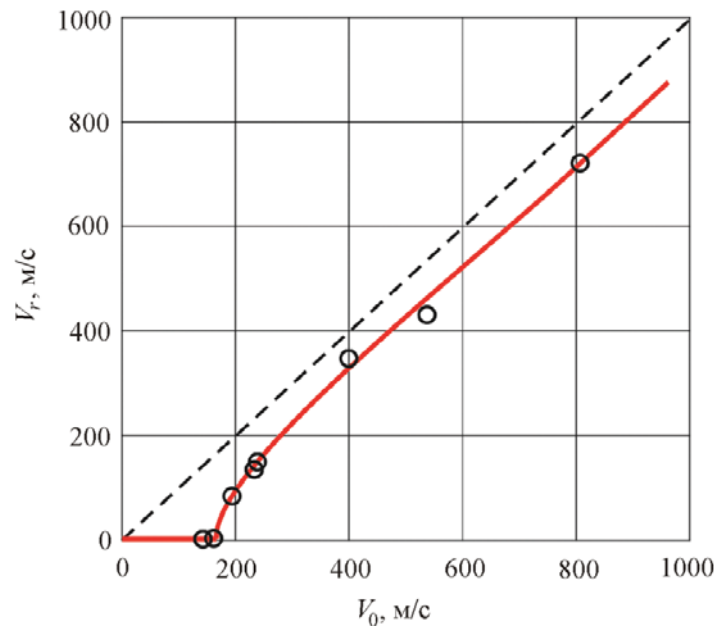


Рис. 1. Баллистическая кривая пластины из стеклопластика

2. Зона расслоения

Для определения зоны расслоения материала были изучены поврежденные пластины из стеклопластика СТЭФ после баллистических испытаний (см. п. 1). Образцы из стеклопластика являются полупрозрачными, и зоны расслоения визуализируются без использования дополнительных средств. Расслоения имели вид эллипса, размеры осей которого были определены на инструментальном микроскопе МИМ-1 с погрешностью не более 0,5 мм. В результате обработки экспериментальных данных была получена зависимость площади зоны расслоения в образце от начальной скорости ударника V_0 (рис. 2).

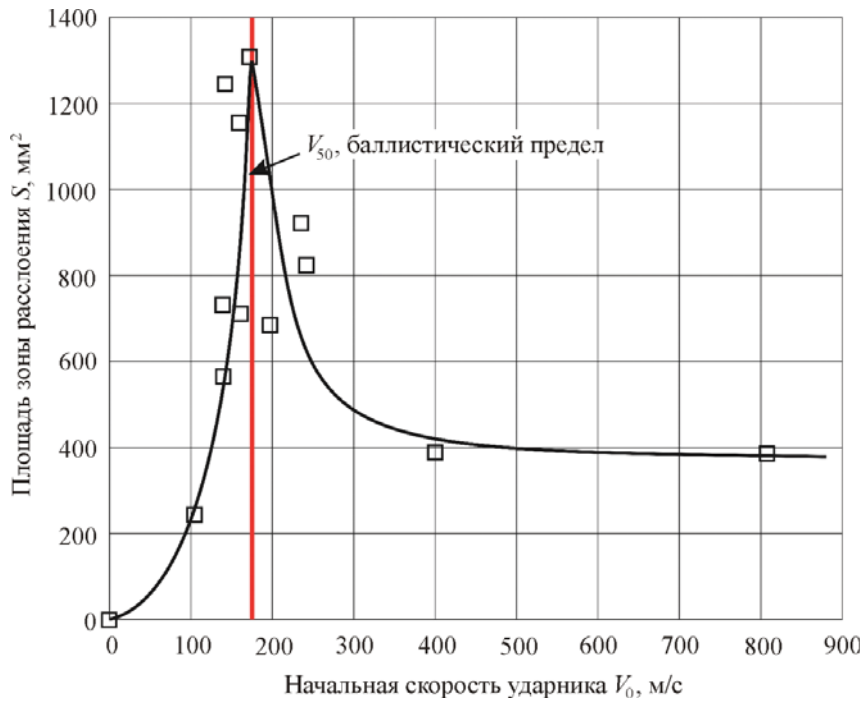


Рис. 2. Зависимость площади зоны расслоения от начальной скорости ударника V_0

Наибольшая зона повреждений образуется при скорости, близкой к баллистическому пределу. Это связано с тем, что в этом случае образец поглощает всю кинетическую энергию от ударного воздействия за счет расслоения. Далее, для получения более подробной информации о размере трещин образцы были разрезаны на низкоскоростной алмазной пиле и помещены в цифровой просвечивающий микроскоп. На рис. 3 представлен снимок поперечного разреза образца при 20-кратном увеличении. Получено, что максимальная ширина трещины в зоне расслоения достигает 50 мкм.

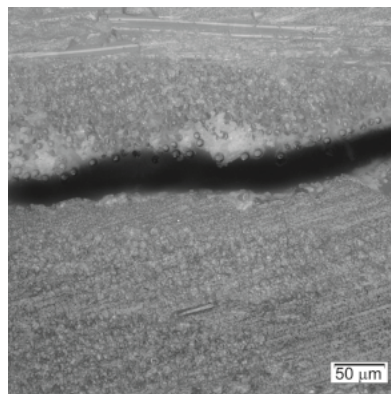


Рис. 3. Поперечный разрез образца

3. Определение остаточной прочности

Остаточную прочность после баллистических повреждений определяли на испытательной машине INSTRON 5882 при нормальных условиях. Деформацию образца измеряли с помощью навесного однокомпонентного экстензометра (Dynamic Strain Gauge Extensometr 2630-107).

Для анализа прогрессирующего повреждения материала в зоне расслоения задавали малоцикловое пульсирующее растяжение (с полным снятием нагрузки). Схема нагружения представлена на рис. 4.

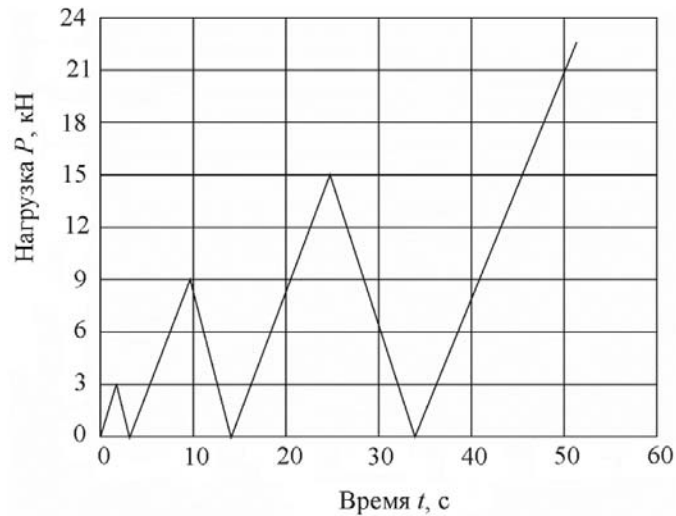


Рис. 4. Схема нагружения

Характерный вид диаграммы деформирования представлен на рис. 5. Отметим, что заметное снижение жесткости (накопление микрповреждений) происходит при нагрузках, составляющих $\sim 80\%$ от разрушающих. Разрушающая нагрузка и предел прочности материала представлен в табл. 1. Предел прочности поврежденных образцов рассчитывали как отношение максимальной нагрузки к площади поперечного сечения образца в виде прямоугольника с известными размерами.

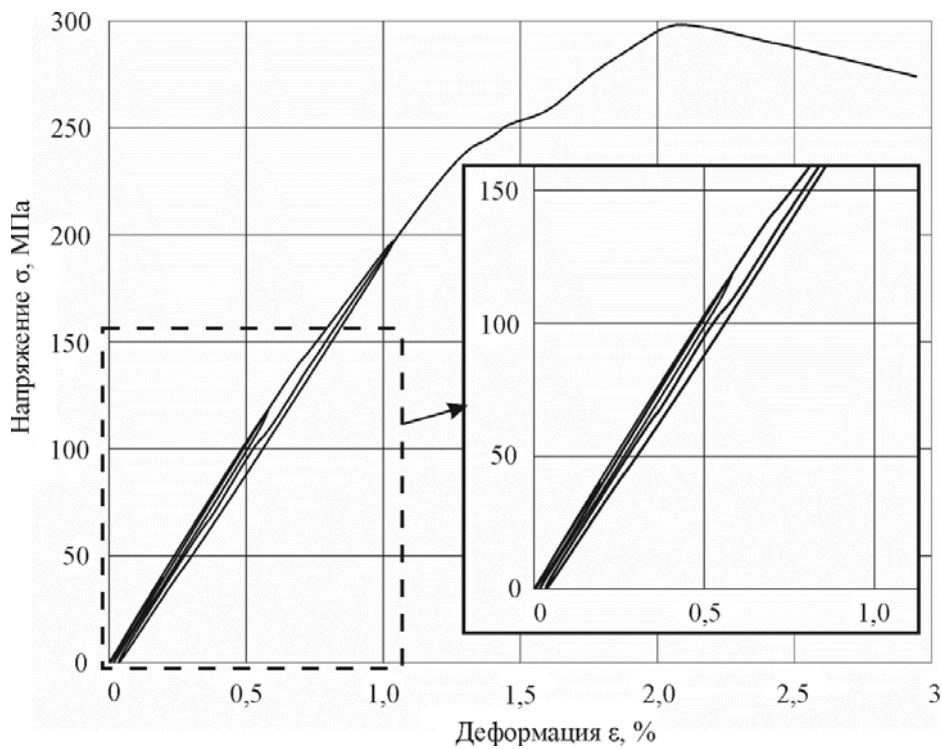


Рис. 5. Диаграмма деформирования при растяжении

Таблица 1

Остаточная прочность

| Номер образца | Маркировка образца | Ширина b , мм | Толщина h , мм | Начальная длина l_0 , мм | Площадь зоны расслоения, мм ² | Максимальное усилие P_{\max} , кН | Предел прочности σ_b , МПа |
|---------------|--------------------|-----------------|------------------|----------------------------|--|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 10 | 40 | 1,9 | 55 | 0 | 30,7 | 404 |
| 2 | 11 | | | | 0 | 23,7 | 312 |
| 3 | 16 | | | | 0 | 25,3 | 332 |
| 4 | 17 | | | | 0 | 27,2 | 358 |
| 5 | 1 | | | | 463 | 17,7 | 232 |
| 6 | 2 | | | | 388 | 17,3 | 227 |
| 7 | 3 | | | | 828 | 18,0 | 237 |
| 8 | 4 | | | | 686 | 18,3 | 241 |
| 9 | 5 | | | | 1158 | 20,6 | 271 |
| 10 | 6 | | | | 712 | 18,3 | 241 |
| 11 | 7 | | | | 1248 | 20,0 | 264 |
| 12 | 8 | | | | 730 | 22,6 | 297 |
| 13 | 9 | | | | 244 | 28,2 | 372 |
| 14 | 12 | | | | 921 | 16,5 | 217 |
| 15 | 13 | | | | 569 | 22,3 | 293 |
| 16 | 14 | | | | 1308 | 18,2 | 240 |
| 17 | 15 | | | | 390 | 17,2 | 226 |

На основании полученных результатов были построены зависимости остаточной прочности в образцах от площади зоны расслоения и начальной скорости ударника (рис. 6, 7). Стоит отметить, что в образцах под номерами 13 и 15 разрушение образца происходило не в месте повреждения, а по захватам. Это означает, что реальная прочность этих образцов оказывается выше, чем указанная в табл. 1.

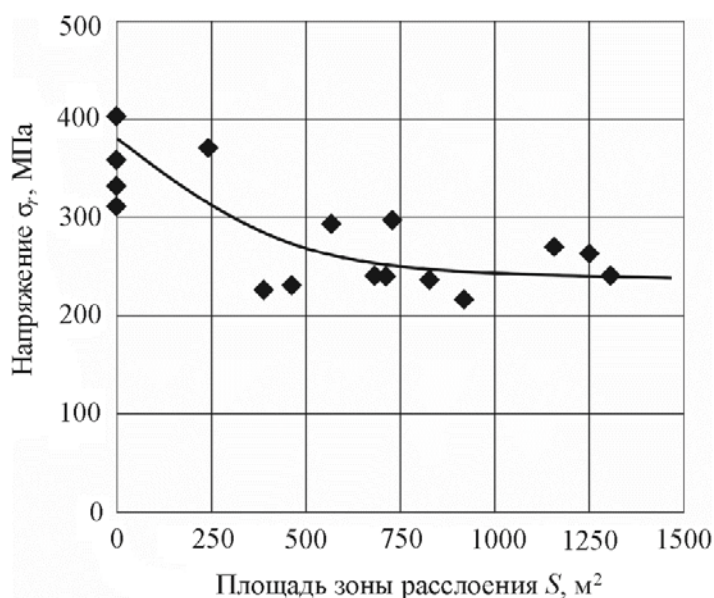


Рис. 6. Зависимость остаточной прочности от площади зоны расслоения

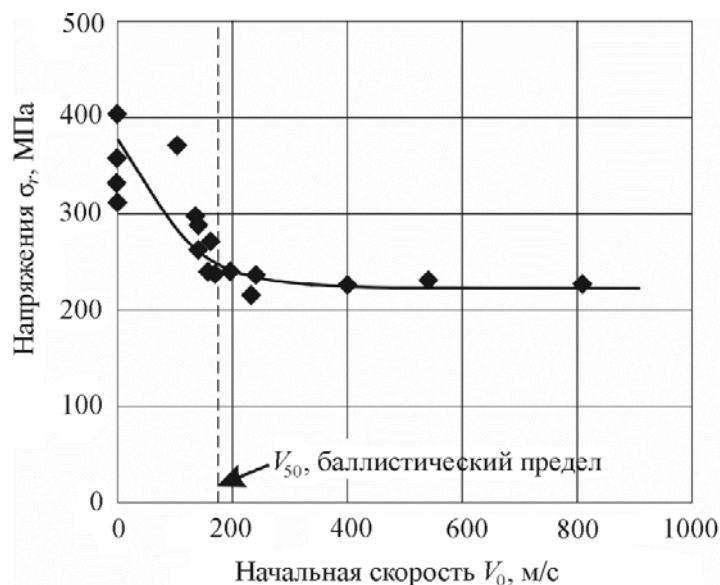


Рис. 7. Зависимость остаточной прочности от начальной скорости ударника

Как видно из зависимостей, представленных на рис. 6 и 7, с увеличением скорости ударника происходит достаточно резкое снижение прочностных свойств стеклопластика, постепенно переходящее в постоянное значение остаточной прочности. Это объясняется тем, что при скоростях выше 300 м/с происходит пробой образца с разрушением волокон при минимальных значениях площади зоны расслоения. И снижение прочности из-за разрыва волокон является более существенным, чем из-за расслоений.

В результате для образцов с дефектами из стеклопластика СТЭФ (толщина 1,9 мм, ширина 40 мм) при растяжении остаточная прочность снижается в зависимости от начальной скорости и размера зоны расслоения с 380 МПа до величин около 210 МПа. Это значит, что, закладывая коэффициент запаса порядка 2,0, при таком повреждении конструкция не разрушится при одноразовом нагружении. Это соотносится с данными по снижению прочности композитных панелей с отверстиями, полученными Daniels [17]. Таким образом, остаточную прочность образцов с повреждениями можно определить, используя приближенный экспресс-метод, основанный на энергетическом подходе [18].

Оценку прочности конструкции из стеклопластика проводили по критерию, в котором учтена нелинейность диаграмм деформирования композита в верхней его части с использованием энергетических соображений Г. Нейбера (поиск напряжений и деформаций на нелинейном участке диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ » по известному упругому решению с использованием гиперболы $\sigma\varepsilon = \text{const}$, рис. 8). На гиперболе все точки имеют одинаковую удельную энергию деформирования $\sigma\varepsilon$.

На рис. 9 изображены результаты расчета нормальных напряжений в пакете ANSYS Workbench образца с отверстием диаметром $D = 17$ мм с размером конечного элемента $A = 1$ мм, α_s – коэффициент концентрации осредненных напряжений.

Эффективный предел прочности для материала СТЭФ $F_{x_t}^{**} = (536 \pm 22)$ МПа.

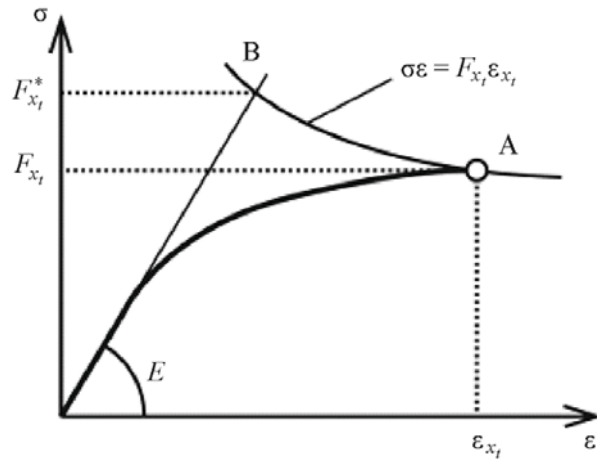
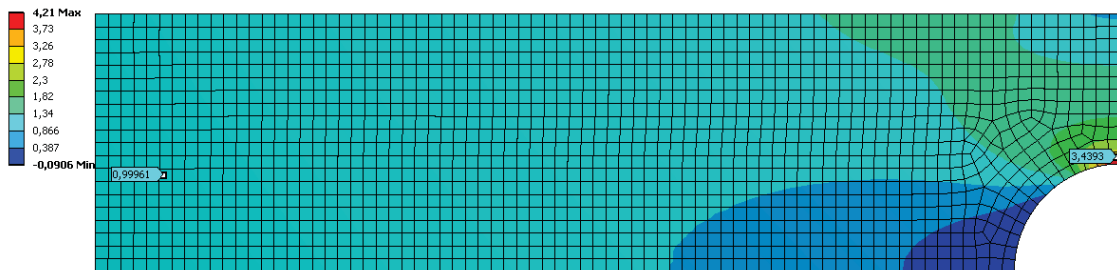


Рис. 8. Гипербола Г. Нейбера при неупругом анализе напряжений у концентраторов



$$\alpha_s = 3,42 (\Delta = 1 \text{ мм})$$

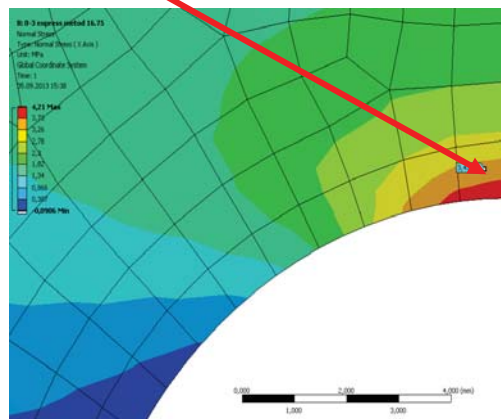


Рис. 9. Расчет напряжений в пакете ANSYS Workbench образца из материала СТЭФ с отверстием

Напряжения разрушения можно определить по формуле

$$\sigma_{Cr} = F_{x_t}^* / \alpha_s. \quad (1)$$

Сравнение экспериментальной и теоретической прочности (для четырех одинаковых образцов) и погрешности данного метода представлены в табл. 2. Как видно, ошибка при применении данной гипотезы составляет менее 10 %.

Таблица 2

Сравнение экспериментальной и теоретической прочности

| ε | F_{x_i} | E_x | $F_{x_i}^*$ | α_s | $\sigma_{Cr \text{ теор}}$ | $\sigma_{Cr \text{ эксп}}$ | Ошибка, % |
|---------------|-----------|----------|-------------|------------|----------------------------|----------------------------|-----------|
| 0,03 | 388 | 2,69E+04 | 514 | 3,42 | 150 | 165 | -9,1 |
| 0,03 | 390 | 2,71E+04 | 517 | 3,04 | 170 | 156 | 8,91 |
| 0,03 | 395 | 2,72E+04 | 536 | 2,72 | 197 | 195 | 0,85 |
| 0,03 | 400 | 2,78E+04 | 551 | 2,75 | 200 | 198 | 0,86 |

4. Ремонт

Так как даже небольшие повреждения существенно снижают нагрузку разрушения образцов, нами разработан эффективный метод ремонта расслоений. Для этого используются жидкий матричный компаунд и ультразвуковой возбудитель, помогающий вязкой матрице разогреться и проникнуть в трещины и расслоения через отверстия малого диаметра, предварительно выполненные в зоне расслоения.

Для улучшения пропитывания трещин полимерным компаундом были изучены факторы, влияющие на реологические свойства матрицы (вязкость компаунда и поверхностное натяжение в аспекте капиллярных эффектов), а также изменение этих свойств при изменении температуры.

4.1. Смачиваемость

Смачивание поверхности твердого тела характеризуется краевым углом θ . Поэтому были проведены эксперименты по определению изменения краевого угла [19] в зависимости от температуры компаунда по методу лежащей капли. В методе лежащей капли измеряется угол между твердой поверхностью и жидкостью в точке контакта трех фаз (жидкость–твердое тело–воздух). В наших опытах в качестве твердой поверхности была взята стеклянная пластина (в стеклопластике основной компонент – стеклянные волокна), а компаунд состоял из эпоксидной смолы ЭД20 и отвердителя ПЭПА (10 % по массе). В результате была получена зависимость краевого угла от температуры (рис. 10)

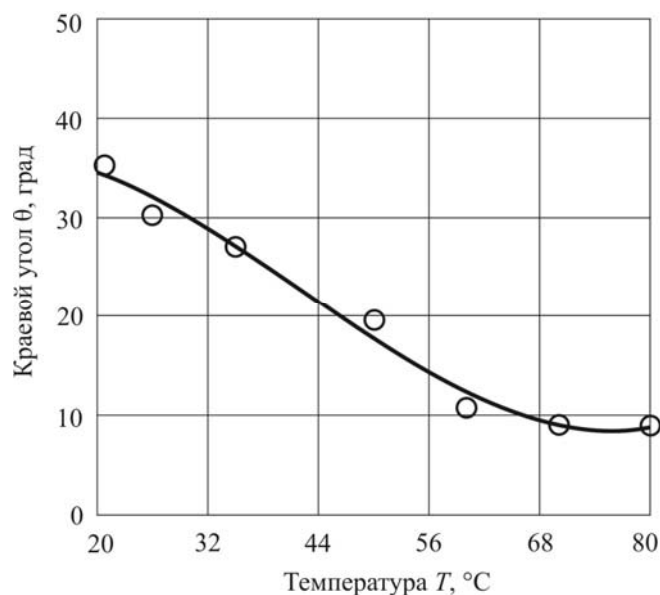


Рис. 10. Зависимость краевого угла от температуры

4.2. Поверхностное натяжение

Для определения поверхностного натяжения σ были проведены эксперименты по методу «пластины Вильгельми» [19]. Эксперименты проводились при различных температурах компаунда. В методе Вильгельми стеклянная пластина, касаясь поверхности жидкости, смачивается ею вдоль периметра. При этом необходимо измерять силу, возникшую в результате смачивания. Для этой цели использовали высокоточный силоизмеритель испытательной машины INSTRON 5942 с максимальным усилием 10 Н.

Поверхностное натяжение рассчитывается на основании измеряемой силы F , смачиваемой поверхности L (периметр пластины) и краевого угла смачивания θ , полученного выше:

$$\sigma = \frac{F}{L \cos \theta}. \quad (2)$$

При исследованных температурах зависимость поверхностного натяжения матричного компаунда от температуры оказывается нелинейной (рис.11), так как исследуемая жидкость является вязкой (для теоретически «идеальных жидкостей» подобная зависимость должна быть линейной [20]).

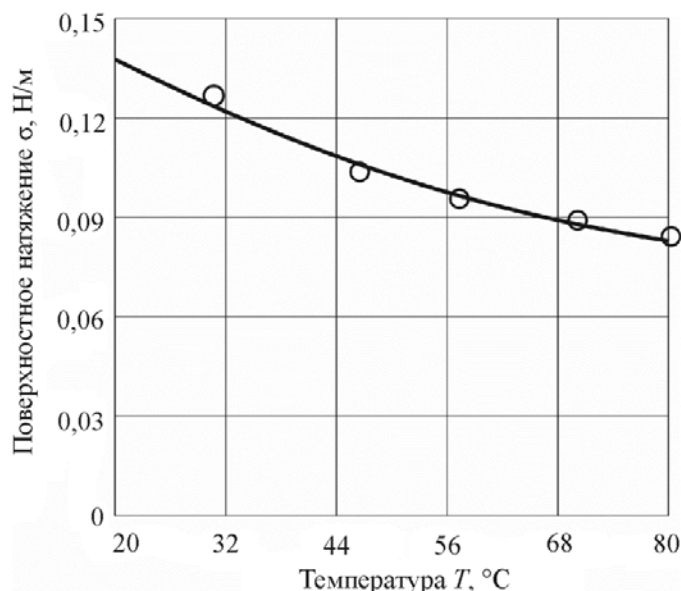


Рис. 11. Зависимость поверхностного натяжения от температуры

4.3. Критическая высота подъема жидкости

Для нахождения максимальной высоты подъема жидкости при различных температурах компаунда была использована формула

$$l_{\max} = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot d}, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения; ρ – плотность жидкости; l_{\max} – критическая высота подъема столба жидкости в капилляре; r – радиус капилляра.

Поверхностное натяжение и краевой угол были экспериментально определены выше, также во введении оговаривались размеры трещин при низкоскоростном ударе.

4.4. Вязкость компаунда

Экспериментальное исследование вязкости компаунда при различных температурах было проведено на вискозиметре Brookfield CAP 2000+. В результате была получена зависимость вязкости компаунда от температуры (рис. 12).

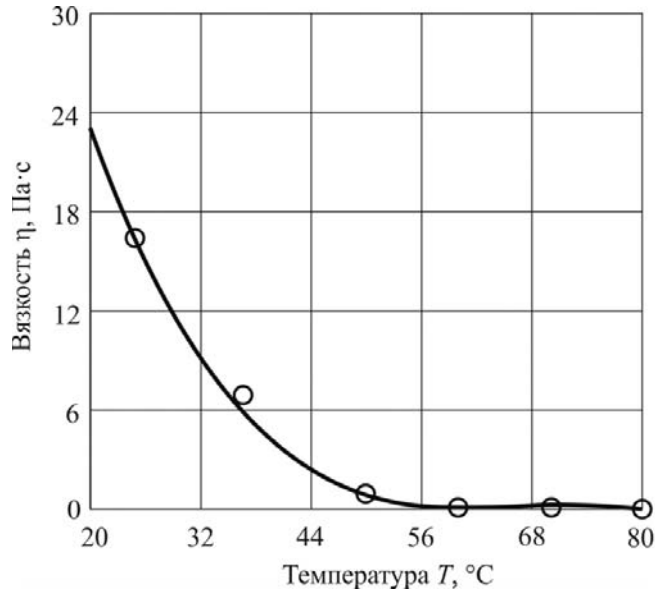


Рис.12. Зависимость вязкости от температуры

Как видно из графика, с повышением температуры вязкость компаунда значительно снижается, увеличивается скорость пропитки компаундом микротрещин. Однако при высоких температурах время полимеризации компаунда значительно сокращается, поэтому были проведены эксперименты по определению изменения вязкости во времени (в процессе отверждения) при различных температурах. Зависимость вязкости от времени представлена на рис. 13.

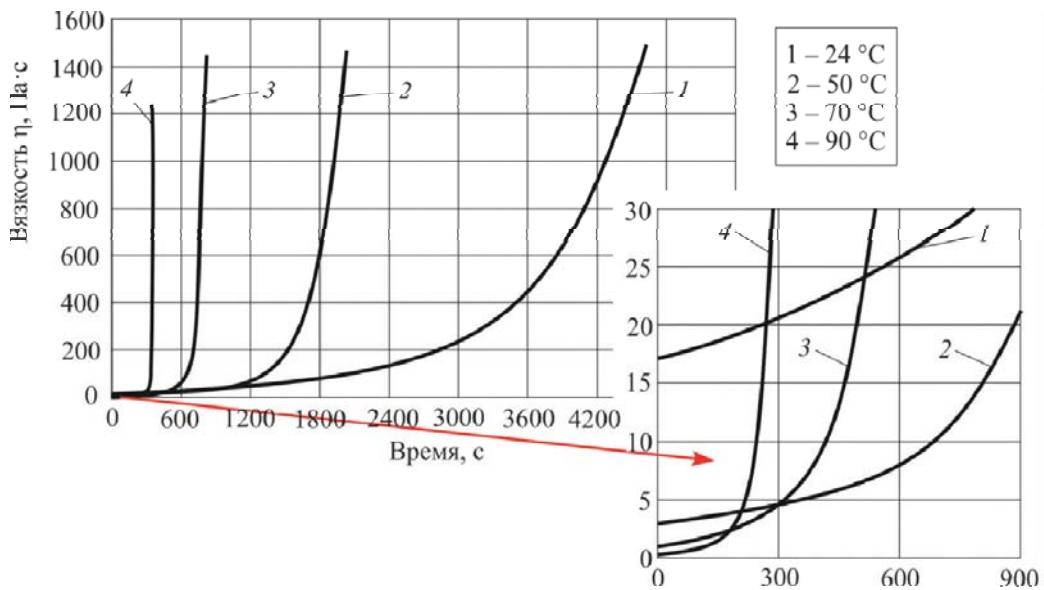


Рис. 13. Зависимость вязкости от времени

4.5. Результаты

Проведенные эксперименты позволяют сделать вывод о существенном изменении поверхностного натяжения, вязкости и краевого угла, связанном с температурой 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.

Зависимость вязкости компаунда от времени $\eta(t)$ была получена путем аппроксимации полученных экспериментальных данных. Далее была найдена зависимость высоты подъема столба жидкости в капилляре от времени (рис. 14) с использованием уравнения для скорости пропитки жидкостью капилляра [19]:

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

где $\eta(t)$ – зависимость 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 .

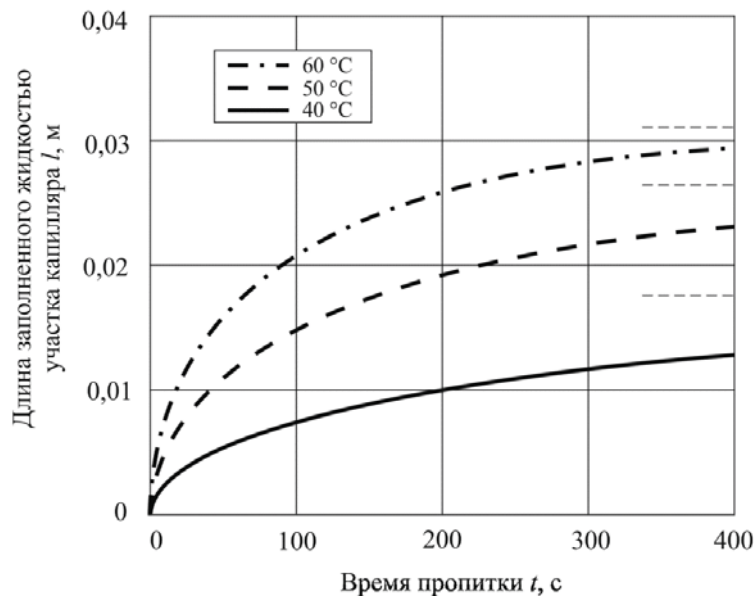


Рис. 14. Зависимость высоты подъема столба жидкости в капилляре от времени

Экспериментально было обнаружено, что ультразвуковой возбудитель (мощностью 600 Вт), используемый в данном методе ремонта, разогревает матричный компаунд в зоне контакта с поверхностью до температур порядка 55–60 °С. При этих температурах вязкость компаунда в течение ~5 минут остается практически постоянной (см. рис. 13). Поэтому было произведено сравнение реологических параметров компаунда для трех различных температур. Результаты данного сравнения приведены в табл. 3.

Параметры эпоксидного компаунда

| $T, ^\circ\text{C}$ | θ , град | σ , мН/м | η , Па·с | l_{max} , мм | t , с | l , мм |
|---------------------|-----------------|-----------------|--------------------|-----------------------|---------|----------|
| 60 | 12,37 | 95 | $0,386e^{0,0058x}$ | 325 | 400 | 29,75 |
| 50 | 17,70 | 102 | $0,915e^{0,0036x}$ | 344 | 400 | 23,25 |
| 40 | 23,92 | 112 | $4,196e^{0,0019x}$ | 362 | 400 | 12,95 |

Эти результаты показывают, что наилучшая пропитка достигается при температуре ~60 °С. Эта температура эпоксидного компаунда признана нами оптимальной для ремонта микротрещин и расслоений предложенным методом.

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.

Заключение

Таким образом, для того чтобы обеспечить ремонт расслоений и микротрещин в композитных конструкциях, необходимо знать реологические и физические характеристики смолы, а также ширину и размеры расслоений.

На основании проведенных экспериментов и выполненных расчетов можно сделать следующие выводы.

1. Наибольшая зона повреждений образуется при скоростях, близких к баллистическому пределу ($V_{50} = 180$ м/с).
2. Размер трещины в зоне расслоения достигает 50 мкм.
3. Остаточная прочность для образцов из стеклопластика марки СТЭФ с повреждениями после баллистических испытаний при растяжении снизилась с 380 до 210 МПа.
4. Ошибка расчета остаточной прочности с использованием «экспресс-критерия» для оценки предела прочности композитных материалов с отверстием составила менее 10 %.
5. В результате использования предложенного метода прочность образца после заливания составляет 80–90 % от гладкого неповрежденного.
6. Максимальный эффект пропитки микротрещин и расслоений компаундом достигается при температуре 60 °С.

Исследование выполнено в Южно-Уральском государственном университете (национальном исследовательском университете) за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00327). Все эксперименты проведены на оборудовании научно-образовательного центра «Нанотехнологии» ЮУрГУ.

Библиографический список

1. Abrate S. Impact on composite structures. – New York: Cambridge University Press, 1998.
2. Low-velocity impact behavior of CNF-filled glass-reinforced polyester composites / M.E. Hosain, M.K. Hossain, M. Hosur, S. Jeelani // Journal of Composite Materials. – 2014. – Vol. 48. – P. 879–896. DOI: 10.1177/0021998313480194

3. Research on low velocity impact damage of laminated composite / S.C. Long, Z.J. Li, G. Kuang, Y.B. He, X.H. Yao // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 513–517. – P. 201–205. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.513-517.201
4. Prediction of residual strength of laminated composites subjected to low velocity impact / Y. Zhao, C. Hess, E.V.K. Hill, C.-S. Wang // *Proceedings of the Annual Technical Conference ANTEC–2004*. – Chicago, United States, May 16–20, 2004. – Vol. 2. – P. 1369–1373.
5. Guan Z., Yang C. Low-velocity impact and damage process of composite laminates // *Journal of Composite Materials*. – 2002. – Vol. 36. – P. 851–871. DOI: 10.1177/0021998302036007512
6. Balasubramani V., Rajendra Boopathy S. Prediction of residual tensile strength of laminated composite plates after low velocity impact // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2014. – Vol. 9. – P. 320–325.
7. Analysis of adhesively bonded repairs in composites: Damage detection and prognosis / M.A. Caminero, S. Pavlopoulou, M. Lopez-Pedrosa, B.G. Nicolaisson, C. Pinna, C. Soutis // *Composite Structures*. – 2013. – Vol. 95. – P. 500–517. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.07.028
8. Battle damage repair of a helicopter composite main rotor blade / W.K. Chiu, Z. Zhou, J. Wang, A. Baker // *Composites. Part B: Engineering*. – 2012. – Vol. 43. – P. 739–753. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.07.014
9. Campbell F.C. *Structural Composite Materials*. – Materials Park. – ASM International Technical Book Committee, 2010.
10. Caliskan M. Evaluation of bonded and bolted repair techniques with finite element method // *Materials and Design*. – 2006. – Vol. 27. – P. 811–820. DOI: 10.1016/j.matdes.2006.01.024
11. Injection repair of carbon fiber/bismaleimide composite panels with bisphenol E cyanate ester resin / M. Thunga, A. Bauer, K. Obusek, R. Meilunas, M. Akinc, M.R. Kessler // *Composites Science and Technology*. – 2014. – Vol. 100. – P. 174–181. DOI: 10.1016/j.compscitech.2014.05.024
12. Savage G., Oxley M. Repair of composite structures on Formula 1 race cars // *Engineering Failure Analysis*. – 2010. – Vol. 17. – P. 70–82. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2008.11.006
13. Sapozhnikov S., Zhikharev M. Impact damages and healing of GFRP sandwich skin // *ECCM-16. 16th European conference on composite materials*. – Seville, Spain, 2014, June 22–26. – P. 8.
14. ГОСТ 12652–74. Стеклотекстолит электротехнический листовой – Введ. 1976–01–01. – 14 с. [Электронный ресурс]. – URL: <http://standartgost.ru/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2%2012652-74> (дата обращения: 29.06.2015)
15. Сапожников С.Б., Кудрявцев О.А. Компактный разгонный стенд для баллистических испытаний // *Вестн. ЮУрГУ. Сер. Машиностроение*. – 2012. – № 20. – С. 139–143.
16. Lambert J.P., Jonas G.H. *Towards standardization in terminal ballistics testing: Velocity representation*, BRL Report No. 1852 / U.S. Army Ballistic Research Laboratories. – MD.: Aberdeen Proving Ground, 1976.
17. Danial I.M., Ishai O. *Engineering mechanics of composite materials*. – New York: Oxford University Press, 2006.
18. Sapozhnikov S.B., Cheremnykh S.I. The strength of fibre reinforced polymer under a complex loading // *Journal of Composite Materials*. – 2013. – Vol. 47. – P. 2525–2552. DOI: 10.1177/0021998313476328
19. Levine I.N. *Physical Chemistry*. – 5th ed. – Boston: McGraw-Hill, 2001.
20. Фролов Ю.Г. *Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы*. – М.: Химия, 1988. – 464 с.

References

1. Abrate S. *Impact on composite structures*. New York: Cambridge University Press, 1998.
2. Hossain M.E., Hossain M.K., Hosur M., Jeelani S. Low-velocity impact behavior of CNF-filled glass-reinforced polyester composites. *Journal of Composite Materials*, 2014, vol. 48, pp. 879–896. DOI: 10.1177/0021998313480194

3. Long S.C., Li Z.J., Kuang G., He Y.B., Yao X.H. Research on low velocity impact damage of laminated composite. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 513-517, pp. 201-205. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.513-517.201
4. Zhao Y., Hess C., Hill E.V.K., Wang C.-S. Prediction of residual strength of laminated composites subjected to low velocity impact. *Proceedings of the Annual Technical Conference. ANTEC 2004. Chicago, United States, May 16-20, 2004*, vol. 2, 2004, pp. 1369-1373.
5. Guan Z., Yang C. Low-velocity impact and damage process of composite laminates. *Journal of Composite Materials*, 2002, vol. 36, pp. 851-871. DOI: 10.1177/0021998302036007512
6. Balasubramani V., Rajendra Boopathy S. Prediction of residual tensile strength of laminated composite plates after low velocity impact. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2014, vol. 9, pp. 320-325.
7. Caminero M.A., Pavlopoulou S., Lopez-Pedrosa M., Nicolaisson B.G., Pinna C., Soutis C. Analysis of adhesively bonded repairs in composites: Damage detection and prognosis. *Composite Structures*, 2013, vol. 95, pp. 500-517. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.07.028
8. Chiu W.K., Zhou Z., Wang J., Baker A. Battle damage repair of a helicopter composite main rotor blade. *Composites. Part B: Engineering*, 2012, vol. 43, pp. 739-753. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.07.014
9. Campbell F.C. *Structural Composite Materials*. Materials Park. ASM International Technical Book Committee, 2010.
10. Caliskan M. Evaluation of bonded and bolted repair techniques with finite element method. *Materials and Design*, 2006, vol. 27, pp. 811-820. DOI: 10.1016/j.matdes.2006.01.024
11. Thunga M., Bauer A., Obusek K., Meilunas R., Akinc M., Kessler M.R. Injection repair of carbon fiber/bismaleimide composite panels with bisphenol E cyanate ester resin. *Composites Science and Technology*, 2014, vol. 100, pp. 174-181. DOI: 10.1016/j.compscitech.2014.05.024
12. Savage G., Oxley M. Repair of composite structures on Formula 1 race cars. *Engineering Failure Analysis*, 2010, vol. 17, pp. 70-82. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2008.11.006
13. Sapozhnikov S., Zhikharev M. Impact damages and healing of GFRP sandwich skin. ECCM-16. 16th European conference on composite materials, Seville, Spain, June 22-26, 2014, p. 8.
14. Electrotechnical glass-cloth-base laminate. Specifications. GOST 12652-74, 2008.04.01, 1976.01.01, 14 p., available at: <http://standartgost.ru/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2%2012652-74> (accessed 29 June 15).
15. Sapozhnikov S.B., Kudryavtsev O.A. Compact accelerator for ballistic testing. *Vestnik Iuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Mashinostroenie*, 2012, vol. 20, pp. 139-143.
16. Lambert J.P., Jonas G.H. Towards standardization in terminal ballistics testing: Velocity representation, BRL Report No. 1852. U.S. Army Ballistic Research Laboratories, Aberdeen Proving Ground, MD, 1976.
17. Danial I.M., Ishai O. *Engineering mechanics of composite materials*. New York: Oxford University Press, 2006.
18. Sapozhnikov S.B., Cheremnykh S.I. The strength of fibre reinforced polymer under a complex loading. *Journal of Composite Materials*, 2013, vol. 47, pp. 2525-2552. DOI: 10.1177/0021998313476328
19. Levine I.N. *Physical Chemistry*. Boston: McGraw-Hill, 2001.
20. Frolov Yu.G. *Kurs kolloidnoi khimii. Poverkhnostnye iavleniia i dispersnye sistemy* [The course of colloid chemistry. Surface phenomena and disperse systems]. Moskow: Khimiia, 1988. 464 p.