

ТИПЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ ТКАНЕВОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА И РЕМОНТ РАССЛОЕНИЙ ПОСЛЕ НИЗКОСКОРОСТНОГО УДАРА

(поступила в редакцию 04.09.2014, принята в печать – 30.09.2014)

С.Б.Сапожников, М.В.Жихарев

*Южно-Уральский Государственный университет, Физический факультет,
проспект Ленина, 76, Челябинск, Россия, 454080*

Проведены баллистические испытания тонких стеклопластиковых пластин. Для этой цели был разработан и изготовлен настольный стенд, позволяющий ускорять стальную сферу диаметром 8 мм до 700 м/с, используя энергию стандартного монтажного патрона. Отмечены сквозные повреждения (высокоскоростной удар) и расслоение (низкоскоростной удар) с минимальным повреждением наружного слоя. Для ремонта расслоений предложено выполнять сквозные сверления малого диаметра в зоне расслоения и использовать ультразвуковой возбудитель для интенсификации заполнения пустот полимерной матрицей. Прочность при сжатии после удара и ремонта составляет 80-90% от исходной.

Ключевые слова: стеклопластик, баллистический предел, расслоение, пробивание, ультразвуковой возбудитель, ремонт.

TYPES OF DAMAGE OF WOVEN GFRP AND REPAIR OF LOW VELOCITY IMPACT DELAMINATIONS

S.B. Sapozhnikov, M. V. Zhikharev

South Ural State University, Physics Department, Lenin ave., 76, Chelyabinsk, Russia, 454080

A experimental study of ballistic impact on thin GFRP plates (plain glass fabric with epoxy matrix) with various velocities. There was designed and made a table-top facility for accelerating steel ball of a diameter of 8 mm up to 700 m/s by using energy of standard dowel hammering cartridge. There were observed crosscutting damage at high velocity impact and delamination with minimal damage of outer layer fibers at low velocity impact. To repair delamination it was suggested to drill small holes within the delamination zone and use ultrasound exciter to intensify liquid matrix impregnation. Compression strength of a plate after repair occurs to be 80-90% of the original value.

Keywords: GFRP, ballistic limit, delamination, penetration, ultrasound exciter, repair.

1. Введение

Для измерения начальной и остаточной скорости ударника при пробивании преград применяются различные типы экспериментальных установок, использующих для разгона ударников энергию сжатых газов или пороха [1, 2]. Измерения начальной скорости ударника проводятся с использованием специальных приборов – хронографов [3]. Наибольшие сложности возникают при измерении остаточной скорости ударника, так как вместе с ним могут двигаться осколки преграды. В случае с полимерными композитами в качестве мишеней осколки образуют облако пылевидных частиц, затрудняя применение хронографов или высокоскоростных оптических камер. Поэтому в исследованиях вместо остаточной скорости ударника используются измерения остаточного импульса на баллистических маятниках, это заставляет применять крупногабаритные стационарные установки. В настоящей статье предложена настольная установка для разгона сферических ударников массой до 2 г со скоростями до 700 м/с и измерением остаточного импульса оригинальной фрикционной ловушкой.

При эксплуатации композитных конструкций, например, в авиации, можно выделить два случая, при которых образуются дефекты несущих поверхностей: наземная эксплуатация (удары падающим инстру-

ментом при обслуживании и т.п. – низкоскоростной удар) и полетные случайные повреждения (бетонная крошка из-под переднего колеса при взлете, осколки снарядов и пуль в боевых ситуациях – высокоскоростной удар). При работе ветроэнергетических установок актуальны вопросы повреждений, связанные с попаданием в лопасти птиц.

Значительная разница между высокими и низкими скоростями удара объясняется волновыми эффектами [4]. Они определяют различия между статическими ударами тела с большой массой и динамическим нагружением тела малой массы. В частности, динамическое нагружение малой массой происходит с достаточно высокой скоростью, это означает, что необходимо рассматривать волновые эффекты. При этом время контакта намного меньше, чем время движения волны [5, 6], отсюда граничные условия оказывают небольшое влияние. При нагружении большими массивными ударниками скорости воздействий гораздо меньше, и нагружение эквивалентно квазистатическому индентированию. Время контакта становится значительно больше периода низшей формы колебаний и, таким образом, результат удара в основном зависит от граничных условий.

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, тогда как снижение прочности конструкции может оказаться значительным [7]. Низкая поперечная сдвиговая жесткость и прочность композитных материалов (КМ) приводит в этих случаях к расслоениям обшивки, что снижает прочность или нагрузки потери устойчивости при сжатии [8-11]. Трещина, инициированная локальным повреждением или другим концентратором, может разрушить крупногабаритную конструкцию, если последняя неудачно спроектирована (обладает недостаточной трещиностойкостью).

Если для металлических конструкций подобного рода небольшие дефекты уже изучены и несущественно влияют на прочность и закладываются в виде дополнительных коэффициентов запаса, то для КМ это сравнительно мало изучено. Поэтому вопросы, связанные с учетом различного рода дефектов при проектировании, а также методики уменьшения влияния и залечивания дефектов являются весьма актуальными.

2. Разгонный стенд

Главная проблема любого разгонного стенда – источник энергии. В предлагаемой конструкции предложено использовать энергию газов стандартных строительно-монтажных патронов (серий D и K), имеющих в свободной продаже [12]. Энергия этих патронов изменяется от 300 до 1000 Дж, этого вполне достаточно для разгона стальных сферических ударников диаметром 8 мм (масса 2.2 г) до скорости 1000 м/с при полном использовании энергии патрона. Серийное производство строительно-монтажных патронов позволяет получить высокую стабильность скоростей метания, а фиксированная длина ствола (150 мм) – обеспечить компактность разгонному блоку и всему стенду в целом (Рис. 1), однако КПД такой установки невысок и по кинетической энергии ударника составляет около 50%. Монтажные патроны имеют боковое воспламенение, что требует изготовления ударного бойка с иглой, смещенной от оси на расстояние ~4.0 мм. Затвор – пружинный механический с ручным взводом, спуск может быть произведен дистанционно. Поскольку сферический ударник имеет в стволе диаметральный зазор около 50 мкм, необходимо использовать пыж. В предлагаемой установке пыж длиной 4 - 5 мм изготовлен из полиэтилена (масса ~0.25 г). Меняя энергоёмкость патрона, или сдвигая пыж с ударником ближе к срезу ствола, можно регулировать скорость вылета. Измерение начальной скорости ударника производится бесконтактным оптическим цифровым хронографом S06 [3] с погрешностью ± 1 м/с (расстояние между оптопарами равно 70 мм). Для предотвращения загрязнения окон оптопар продуктами неполного сгорания пороха хронограф удален от среза ствола на расстояние 150 мм с помощью газоотводящей трубки 3. Мишень устанавливается вблизи среза хронографа на расстоянии 10 - 20 см во избежание его повреждения осколками мишени или ударника.

В результате пробоя преграды скорость индентора снижается, он попадает во фрикционную ловушку 6, передавая ей остаточный импульс. Ловушка представляет собой стальную трубку диаметром 80 мм с тканевой набивкой (общая масса 670 г), установленную на направляющей 8 (стальной уголок) с возмож-

ностью перемещения на некоторое расстояние, преодолевая силы сухого трения. Данное смещение измеряется (погрешность $\pm 0,5$ мм) для последующего пересчета в остаточную скорость ударника по тарировочной зависимости, полученной заранее без использования мишени. Тарировочная зависимость имеет вид $V_r \approx 2,5I \cdot S^{0,5}$, где S – смещение ловушки (мм), V_r – остаточная скорость ударника (м/с).

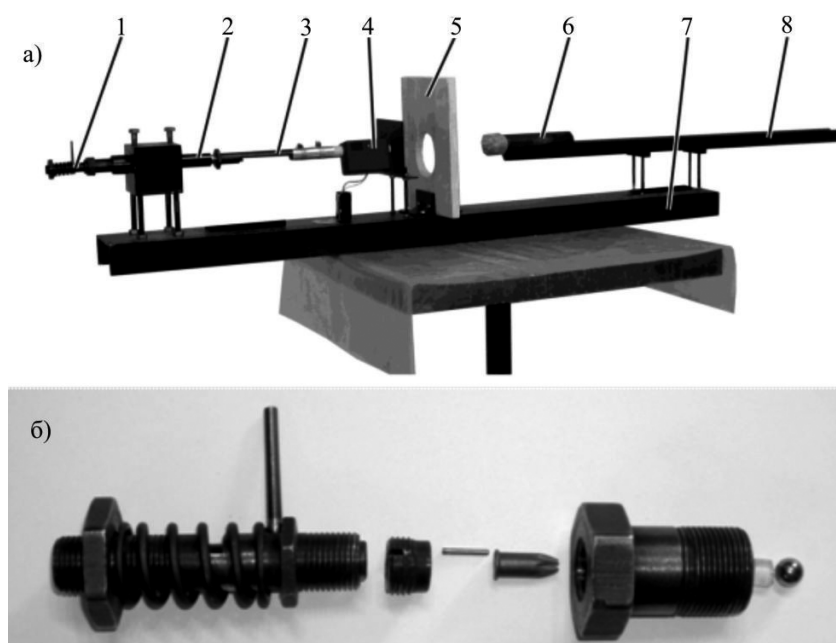


Рис. 1. Настольный разгонный стенд (защитный чехол снят): а) – 1 – затвор; 2 – ствол; 3 – газоотводящая трубка; 4 – измеритель начальной скорости (хронограф); 5 – подставка для мишени; 6 – фрикционная ловушка; 7 – основание; 8 – направляющая ловушки; б) – затвор и казенная часть с пыжом и ударником.
Desk-top facility to do ballistic experiments (a) 1: gate, 2: barrel, 3: gas exhaust tube, 4: measurer of initial velocity, 5: stand for a target, 6: friction trap, 7: base, 8: trap steer; (b) barrel end, wad, and impactor.

Средняя погрешность измерения остаточной скорости V_r не превышает 10 м/с (возможны как случайная непараллельность вектора скорости и оси направляющей, так и флуктуации коэффициента трения по длине направляющей, колебания ловушки в процессе движения и др.). Важно отметить, что перед повторением испытаний ударник должен быть извлечен из ловушки для сохранения ее массы. Предлагаемая установка позволяет оперативно получать кривую зависимости остаточной скорости удара от начальной, затрачивая на подготовку выстрела не более 3 - 4 минут.

3. Исследование механизмов разрушения тканевого стеклопластика при ударе

Для изучения характера повреждения, пластины из стеклопластика СТЭФ [13] (толщина 2 мм, ширина 40 мм) подвергались обстрелу на разработанном выше разгонном стенде. Эксперименты по пробиванию пластин проводились с начальными скоростями 50...600 м/с стального сферического ударника диаметром 8 мм (масса 2,05 г). Обработка экспериментальных данных по удару имитатором осколка проведена с использованием эмпирической зависимости Ламберта [14]. На Рис. 2 приведена зависимость остаточной скорости удара от начальной, из которой следует, что пробивание начинается со скоростей ~ 150 м/с (баллистический предел V_{50}).

При низких скоростях ударника ($V_0 = 50...100$ м/с) наблюдалось разрушение в виде локальных расслоений, Рис.3, а. При умеренных скоростях соударения ($V_0 = 100...150$ м/с) наблюдалось разрушение в виде значительных расслоений с разрывом волокон тыльных слоев, Рис. 3, б. При средних скоростях соударения ($V_0 = 150...350$ м/с) наблюдалось разрушение в виде пробоя всех слоев с большой зоной расслоения, Рис. 3, в.

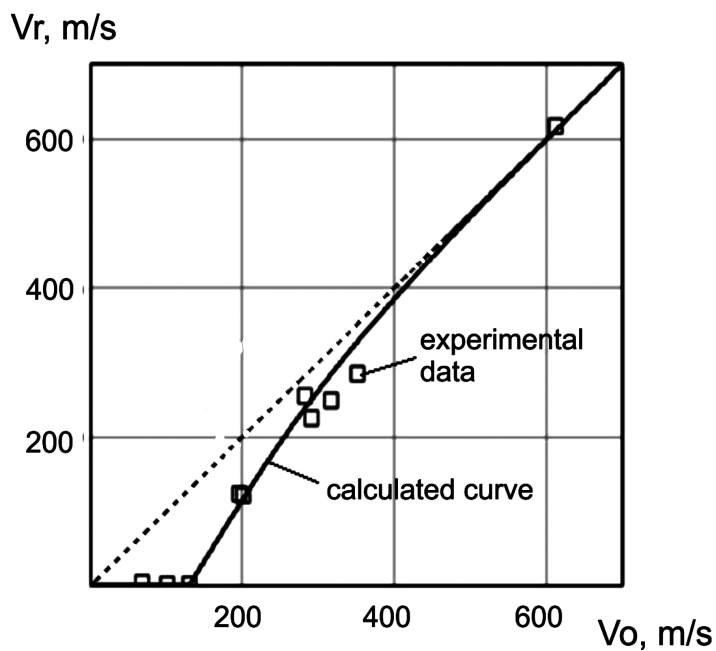


Рис. 2. Зависимость остаточной скорости удара от начальной при ударе по пластине из стеклопластика толщиной 2 мм.

Residual impact velocity versus original velocity for GFRP plate of a thickness of 2 mm.

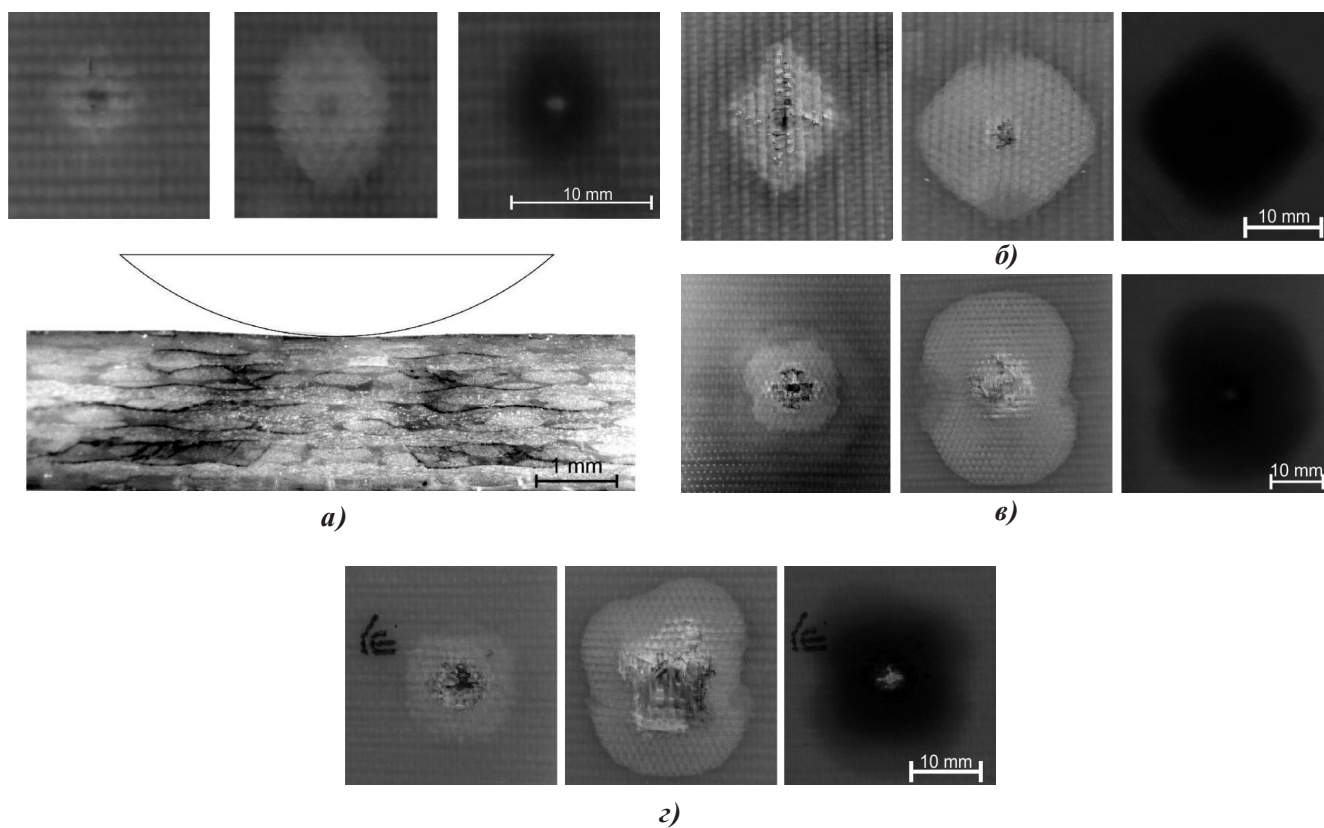


Рис. 3. Типы повреждений образцов.
Types of the specimen damage.

При высоких скоростях ударника ($V_0 = 350 \dots 700$ м/с) наблюдалось разрушение в виде пробоя всех слоев с умеренной зоной расслоения, Рис. 3,г. Различия в характере разрушения объясняются различной величиной энергии, затраченной на повреждения: с увеличением скорости ударника поглощенная энергия снижается.

4. Определение остаточной прочности

Для определения остаточной прочности были проведены испытания на сжатие и растяжение на испытательной машине INSTRON в клиновых захватах, не имеющих возможности бокового качания. Для материала СТЭФ предел прочности при растяжении бездефектной пластины составляет ~ 390 МПа. Даже для незначительных дефектов (энергия удара 2 Дж) прочность падает до ~ 230 МПа.

При сжатии коротких образцов основным механизмом разрушения композитов является межслойный сдвиг. Для предотвращения потери устойчивости образцы закреплялись таким образом, чтобы расстояние между зажимами составляло 5-6 мм.

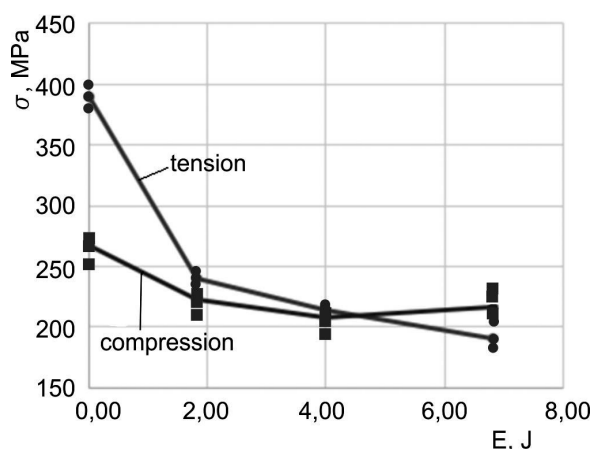


Рис. 4. Зависимость разрушающего напряжения от энергии при ударе.
Limiting stress versus impact energy.

Как показали исследования даже небольшие повреждения (энергия удара до 7 Дж.), получаемые после низких скоростей ударника снижают предел прочности пластин. При этом влияние повреждений (расслоений) на остаточную прочность пластин при растяжении и сжатии различно (Рис.4). Отсюда следует, что расслоения необходимо залечивать.

5. Залечивание расслоений стеклопластика после низкоскоростного удара

Для слоистых стеклопластиков с непрозрачной структурой и при небольших повреждениях сложно в полной мере оценить зону внутреннего расслоения материала. Поэтому экспериментальное исследование таких повреждений (расслоение) было проведено с помощью ИК-камеры TESTO 875.

Нагрев образца происходил ИК-источником мощностью 1 кВт в течение 10 секунд с расстояния 0,2 метра.

Горячая зона на тепловизоре (Рис.5, справа) показывает зону расслоения, поскольку ее теплопроводность снижена.

В ряде публикаций обсуждались варианты ремонта КМ путем вырезания поврежденного участка и монтажа заплаток [14, 16]. Предлагаемый новый метод залечивания небольших повреждений слоистых КМ основан на использовании матричного компаунда и ультразвукового возбудителя, помогающего вязкой матрице разогреться и проникнуть во внутренние расслоения через отверстия небольшого диаметра, которые должны быть выполнены в зоне расслоения. Матрица смачивает поверхности расслоения и после отверждения связывает слои между собой, обеспечивая их дальнейшую совместную работу как и в неповрежденном состоянии. Для этого использован лабораторный ультразвуковой возбудитель (Рис. 6, 7) с мощностью до 300 Вт, частотой колебаний 18 кГц и водяным охлаждением.

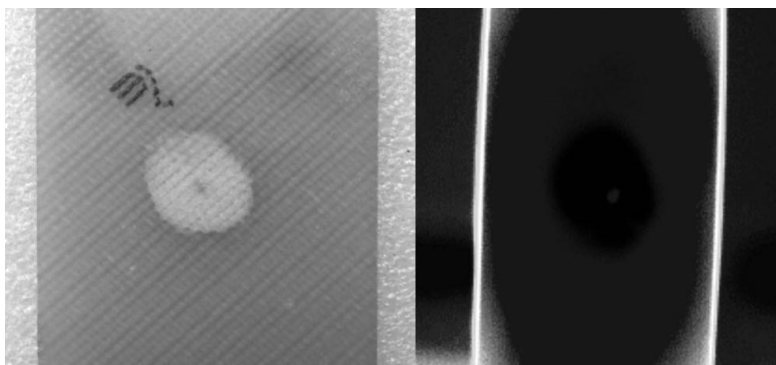


Рис. 5. Исследование повреждений с помощью тепловизора.
Damage as it looks in thermo-imager.



Рис. 6. Ультразвуковой возбудитель
Ultrasound vibrator



Рис. 7. Процесс заживления повреждения
Healing process

Наличие малых отверстий (диаметром до 0,5 мм) практически не снижает прочности КМ [7]. Как показали опыты, отверстия необходимо сверлить по краям зоны расслоения, так как непосредственно под местом удара расслоение не наблюдается (Рис. 3а). На Рис.8 показан образец до (слева) и после (справа) лечения.



Рис. 8. Вид образца до и после лечения.
A damaged specimen before and after healing.

В результате лечения расслоений прочность образцов исследованного стеклопластика при сжатии возросла до 80-90 % от прочности исходного. Анализ показал, что разрушение, тем не менее, происходит в месте дефекта, что требует дальнейшего развития методики.

Заключение

Проведены баллистические испытания образцов и исследовано деформирование и разрушение тканевого композитного материала СТЭФ толщиной 2 мм при высоко- и низкоскоростном ударе. При ударе стальным шариком диаметром 8 мм получен баллистический предел, равный 150 м/с. Предложен новый метод залечивания небольших повреждений слоистых композитов. Метод основан на использовании матричного компаунда, сверлений малого диаметра и ультразвукового возбудителя. В результате залечивания прочность на сжатие образцов исследованного стеклопластика составила 80-90% от прочности исходного неповрежденного материала.

Благодарность

Исследование выполнено в Южно-Уральском государственном университете (национальном исследовательском университете) за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00327).

Библиографический список

1. Zukas J.A., *High Velocity Impact Dynamics*. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1990. 935 pp.
2. Златина Н.А., Мишина Г.И., *Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях*. – М.: Наука, 1974. – 344 с.
3. URL: <http://chronoshop.ucoz.com>.
4. Jackson W., Poe C.C.Jr., The Use of Impact Force as a Scale Parameter for the Impact Response of Composite Laminates, *NASA Technical Memorandum 104189, AVSCOM Technical Report 92-B-0011992*.
5. Faur-Csukat G., A study on the ballistic performance of composites, *Macromolecular Symposia*, 2006, no.239(1), pp. 217-226.
6. Naik N.K., Shrirao P. Composite structures under ballistic impact. *Composite structures*, 2004, vol. 66(1-4), pp. 579-590.
7. Abrate S., *Impact on composite structures*. – New York: Cambridge University Press, 1998. 292 pp.
8. Richardson M.O.W., Wisheart M.J. Review of low-velocity impact properties of composite materials. *Composites: Part A*, 1996, vol. 27A(12), pp. 1123-31.

9. Zhao Y., Hess C., Hill E.V.K., Wang C.-S. Prediction of residual strength of laminated composites subjected to low velocity impact. *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings*. 2004, vol. 2, pp. 1369-1373.
10. Guan Z., Yang C. Low-velocity impact and damage process of composite laminates. *Journal of Composite Materials*, 2002, vol. 36 (7), pp. 851-871.
11. Balasubramani V., Rajendra Boopathy S. Prediction of residual tensile strength of laminated composite plates after low velocity impact. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2014, vol. 9 (3), pp. 320-325.
12. Сапожников С.Б., Кудрявцев О.А. Компактный разгонный стенд для баллистических испытаний. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*, 2012, вып. 20, № 33 (292), с. 139-143.
13. URL: <http://standartgost.ru/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2%2012652-74>
14. Lambert J.P. ARBRL-MR-02828, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proven ground, MD, 1978.
15. 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.
16. 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 (2), pp. 739-753.

References

1. Zukas J.A., *High Velocity Impact Dynamics*. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1990. 935 pp.
2. Zlatina N.A., Mishina G.I., *Ballisticheskie ustanovki i ikh primenenie v eksperimental'nykh issledovaniyakh* [Ballistic accelerator and their use in experimental studies]. Moscow, Nauka, 1974. 344 с. (In Russian).
3. URL: <http://chronoshop.ucoz.com>.
4. Jackson W., Poe C.C.Jr., The Use of Impact Force as a Scale Parameter for the Impact Response of Composite Laminates, *NASA Technical Memorandum 104189, AVSCOM Technical Report 92-B-0011992*.
5. Faur-Csukat G., A study on the ballistic performance of composites, *Macromolecular Symposia*, 2006, no.239(1), pp. 217-226.
6. Naik N.K., Shrirao P. Composite structures under ballistic impact. *Composite structures*, 2004, vol. 66(1–4), pp. 579-590.
7. Abrate S., *Impact on composite structures*. – New York: Cambridge University Press, 1998. 292 pp.
8. Richardson M.O.W., Wisheart M.J. Review of low-velocity impact properties of composite materials. *Composites: Part A*, 1996, vol. 27A(12), pp. 1123–31.
9. Zhao Y., Hess C., Hill E.V.K., Wang C.-S. Prediction of residual strength of laminated composites subjected to low velocity impact. *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings*. 2004, vol. 2, pp. 1369-1373.
10. Guan Z., Yang C. Low-velocity impact and damage process of composite laminates. *Journal of Composite Materials*, 2002, vol. 36 (7), pp. 851-871.
11. Balasubramani V., Rajendra Boopathy S. Prediction of residual tensile strength of laminated composite plates after low velocity impact. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2014, vol. 9 (3), pp. 320-325.
12. Sapozhnikov S.B., Kudriavtsev O.A. Kompaktnyi razgonnyi stend dlia ballisticheskikh ispytaniy [Compact accelerator for ballistic testing]. *Bulletin of the South Ural State University, Series Mechanical Engineering Industry*, 2012, vol. 20 № 33 (292), pp. 139-143. (In Russian).
13. URL: <http://standartgost.ru/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2%2012652-74>
14. Lambert J.P. ARBRL-MR-02828, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proven ground, MD, 1978.
15. 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.
16. 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 (2), pp. 739-753.

Сведения об авторах

С.Б. Сапожников: д-р техн. наук, проф., проф. Южно-Уральского государственного университета (НИУ), Челябинск, Россия, ssb@susu.ac.ru, тел +7(351) 267 91 19;

М.В. Жихарев: аспирант Южно-Уральского государственного университета (НИУ), Челябинск, Россия, zhimisha@yandex.ru, тел +7(909) 088 06 44.