

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-43-47

А.А. Платонов<sup>1</sup>**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПРОШИТОГО НАПОЛНИТЕЛЯ С ПОВЫШЕННОЙ УДАРОСТОЙКОСТЬЮ**

*Дан обзор одной из разновидностей трехмерного армирования ПКМ – прошивки наполнителя, обеспечивающей укрепление традиционного слоистого композита, тем самым улучшая его устойчивость к расслоению. Рассматривается влияние плотности прошивки и толщины прошивной нити на ударостойкость и прочность при сжатии после удара.*

**Ключевые слова:** композиционные материалы; трехмерноармированный, прошитый наполнитель; RFI; сжатие после удара.

*The article provides a review of one of varieties of 3-dimensional reinforcement of PCM – stitching of preforms, providing strengthening of traditional laminated composite, thereby improving its resistance to delamination. The influence of stitching density and thickness of stitching thread on an impact resistance and compression strength after impact are considered.*

**Keywords:** composite materials, 3-dimensional reinforcement, stitched preforms, RFI, compression after impact.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

**Введение**

В мировом машиностроении все более расширяются области и объемы применения полимерных композиционных материалов (ПКМ). На основе ПКМ изготавливаются детали машин с гарантированным уровнем прочностных свойств при существенном снижении массы. Таким деталям можно придавать необходимые физические и химические характеристики в зависимости от реальных условий эксплуатации, что обеспечивает повышение надежности и долговечности машин по сравнению с традиционными конструкциями [1, 2]. Однако у них есть ряд недостатков, один из которых – расслоение в результате ударного воздействия, являющееся одной из основных причин отказа от использования композитов с традиционной слоистой структурой.

**Материалы и методы**

Предварительная прошивка оказалась эффективным методом межслойного армирования наполнителей, позволяющим решить проблему расслоения в ПКМ [3, 4]. Преодоление силы разрыва стежков значительно повышает предел прочности материала в трансверсальном направлении вследствие высокого поглощения энергии в процессе разрушения [5].

В последние годы получили распространение такие методы трехмерного армирования, как *z-pinning* и *tufing*. Однако эти методы являются достаточно дорогостоящими, что делает их непригодными для обычного практического применения. Тем не менее метод *z-pinning* применен при производстве военных самолетов, таких как

Superhornet и Globemaster III. В работах [6, 7] показано, что применение метода *z-pinning* приводит к снижению механических свойств композитов в плоскости, тогда как прошивка – к их повышению или уменьшению. В работе [8] также сравниваются результаты сжатия после удара композитов с различными способами трехмерного армирования и сделан вывод, что при прошивке имеет место самое высокое соотношение увеличения ударостойкости к экономической составляющей. Поэтому разработчиками ПКМ был проявлен интерес к использованию прошивки для улучшения сопротивления материалов к ударным воздействиям. Об этом свидетельствуют и многочисленные научные публикации за последние 5 лет [9–12].

Показатель сжатия после удара остается важным критерием при использовании композиционных материалов в конструкциях (особенно в аэрокосмической промышленности) из-за их значительной восприимчивости к ударным нагрузкам, при этом прочность при сжатии после удара сильно снижается [13]. С учетом эффективности снижения воздействия при расслаивании и улучшения межслойной прочности ПКМ, прошивка использована для увеличения показателя прочности при сжатии после удара [14]. Исследователи оценивают эффект от прошивки при сравнении образцов ПКМ на основе прошитого обычной строчкой наполнителя и непрошитого наполнителя, не уделяя особого внимания таким характеристикам, как плотность стежка прошивки и толщина нити. Увеличение прочности при сжатии после удара может достигать в некоторых случаях 50%. Однако некоторые исследования показывают, что

## Линейные характеристики образцов и объемное содержание волокна (наполнителя)

Вид образца	Шаг стежка $l_c$ , мм	Расстояние между строчками $l_p$ , мм	Плотность прошивки $P_n$ , мм <sup>2</sup>	Толщина образцов $h$ , мм	Объемное содержание наполнителя в ПКМ $V_n$ , %
Непрошитый	–	–	–	4,92	52,3
Прошитый с линейной плотностью нити, текс: 58,8  117,6	6	6	0,028	4,91	52,8
	3	3	0,111	4,90	53,2
	6	6	0,028	4,89	53,5
	3	3	0,111	4,89	53,6

прошивка увеличивает прочность при сжатии после удара незначительно, а в некоторых случаях – вообще не повышает данной характеристики [15, 16]. В случаях, когда упоминается незначительное увеличение прочности при сжатии после удара в основном протестированы образцы с крупными интервалами между рядами стежков – низкой плотностью прошивки, тогда как в исследованиях, демонстрирующих повышение такой прочности, часто проверяются образцы, имеющие маленький интервал между рядами стежков – высокую плотность прошивки. Таким образом, плотность стежка прошивки, вероятно, играет важную роль для повышения прочности при сжатии после удара. Тем не менее до сих пор не проведено полноценных исследований для подтверждения этих предположений. В научно-исследовательских работах по изучению стойкости к повреждениям сшитых композитов также не исследовано влияние толщины нити на прочность при сжатии после удара. Изучение этих параметров прошивки важно, потому что лучшее понимание влияния плотности стежка и толщины нити позволит оптимизировать использование прошивки для эффективного увеличения производительности.

Для получения трехмерноармированных заготовок преформ использовали углеродный наполнитель арт. 3101 фирмы Porcher Ind. на основе жгутов Tenax HTA 5131 3k. Углеродный наполнитель фирмы Porcher 3101 представляет собой равнопрочную ткань саржевого плетения. Часть образцов прошиты арамидными нитями Руслан-СВМ-Н (производство ОАО «Каменскволокно»), в то время как остальные образцы остались непрошитыми. Прошивка осуществлялась нитями линейной плотностью 58,8 и 117,6 текс. Шаг стежка и расстояние между стежками для одних прошитых образцов составили 3 мм, а для других: 6 мм. Плотность прошивки  $P_n$  образцов для испытаний рассчитывалась по следующей формуле:

$$P_n = \frac{1}{l_c \cdot l_p},$$

где  $l_c$  – шаг стежка, определяющийся расстоянием между двумя соседними стежками в одной и той же строчке;  $l_p$  – пространство между стежками, определяющееся расстоянием между двумя соседними рядами строчек.

При формировании образцов методом RFI (метод пропитки сухого наполнителя пленочным связующим) [17, 18] использовали эпоксидное связующее ВСЭ-20 [19–22]. После формирования плит ПКМ – при помощи станка алмазной циркулярной резки – из них вырезали образцы длиной 150 мм и шириной 100 мм. Средняя толщина изготовленных 16-слойных образцов составила 4,9 мм. Испытания образцов проводили на испытательной машине W+b LFM 250 (Швейцария) – толщины и объемное содержание волокна в образцах представлены в таблице.

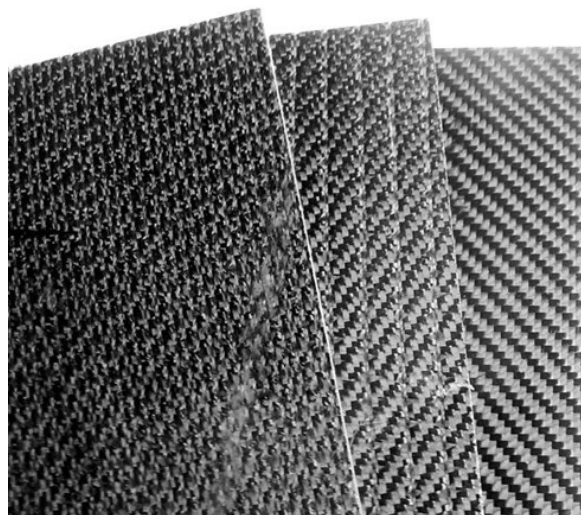


Рис. 1. Прошитые и непрошитый образцы ПКМ

Различные конфигурации прошитых и непрошитого ПКМ представлены на рис. 1.

**Испытания на удар и сжатие после удара**

Испытания на удар проводили на образцах с помощью тестовой машины Ceast 9350 – ударом падающим грузом [23] с постоянной массой 5 кг и полусферическим стальным наконечником  $\varnothing 16$  мм. Энергию удара падающего груза варьировали: 8,3; 21; 33 и 50 Дж. Для того чтобы избежать многочисленных воздействий на образцы, на испытательной машине активирован пневматический отскок. Для каждой энергии удара испытаны по 3 образца.

Затем образцы, закрепленные в специальное приспособление, подвергают испытанию на сжатие при помощи испытательной машины LFM-250 (нагрузка 250 кН). Торцы образцов в приспособлении полностью зажаты, чтобы предотвратить изгиб образца в ходе испытаний на сжатие. Скорость перемещения траверсы при испытаниях составляла 1 мм/мин. Испытания на сжатие после удара проводились согласно ASTM D 7137/D 7137M [24]. Предел прочности при сжатии после удара рассчитывали по формуле:

$$\sigma_{сж}^{уд} = \frac{P}{b \cdot h},$$

где  $\sigma_{сж}^{уд}$  – предел прочности при сжатии;  $P$  – максимальная сжимающая нагрузка;  $h, b$  – средняя толщина и ширина образца соответственно.

### Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены графики зависимости прочности при сжатии после удара от различных энергий удара на образцы. Видно, что прочность при сжатии после удара уменьшается с увеличением энергии удара. Показано также, что прочность при сжатии после удара прошитых композиционных материалов выше, чем непрошитых. Это является результатом двух факторов: во-первых, площадь расслоения после удара копра меньше у прошитых композитов, а, во-вторых, стежки подавляют рост расслаиваний и помогают слоям наполнителя не деформироваться при воздействии нагрузки при сжатии. Выявлено, что плотно сшитые образцы (3×3 мм) имеют заметно более высокую прочность (на ~50%) при сжатии после удара, чем непрошитые образцы. Это обеспечивается значительно меньшим расслоением, возникшим в результате удара, так как в композитах с высокой плотностью прошивки межслоевая прочность значительно более высокая. При высокой энергии удара образцы имеют большое расслоение, что приводит к гораздо большему ослаблению структуры композиционного материала. Известно [4, 11], что прочность при сжатии после

удара уменьшается с увеличением площади расслаивания. Увеличение прочности при сжатии после удара в композитах с низкой плотностью стежков прошивки является менее значительным, но не менее заметным. Это подтверждено результатами работ некоторых исследователей [15, 16], в которых показано незначительное увеличение прочности при сжатии после удара в пластиках с невысокой плотностью прошивки.

Показано также (см. рис. 2), что при низкой энергии удара непрошитые образцы и образцы с низкой плотностью прошивки имеют схожие значения прочности. Таким образом, доказано, что невысокая плотность прошивки имеет небольшое влияние на улучшение прочности при сжатии после удара. Только образцы с высокой плотностью прошивки имеют большое влияние на прочность при сжатии после удара при низких энергиях удара. При рассмотрении высоких значений энергии удара образцы с низкой плотностью прошивки оказывают более значительное влияние на улучшение прочности при сжатии после удара. Еще один вывод заключается в том, что при низких энергиях удара эффект линейной плотности нити не заметен. Тем не менее по мере увеличения энергии удара влияние толщины нити на прочность становится очевидным, в результате чего использование более толстых нитей дает более высокую прочность при сжатии после удара.

Авторами работ [8, 15] замечено, что разброс значений прочностных свойств при испытаниях на сжатие после удара прошитых композитов является относительно небольшим, это главным образом связано с небольшим расслаиванием образцов после удара и сопротивлением стежков прошивки перелому при испытаниях на сжатие. Поэтому в исследованиях проведены испытания трех образцов для каждого случая энергии удара. Результаты проведенных испытаний также показали небольшой разброс в значениях прочностных свойств при сжатии после удара.

На рис. 2 показана зависимость прочности при сжатии после удара от энергии удара, однако не-

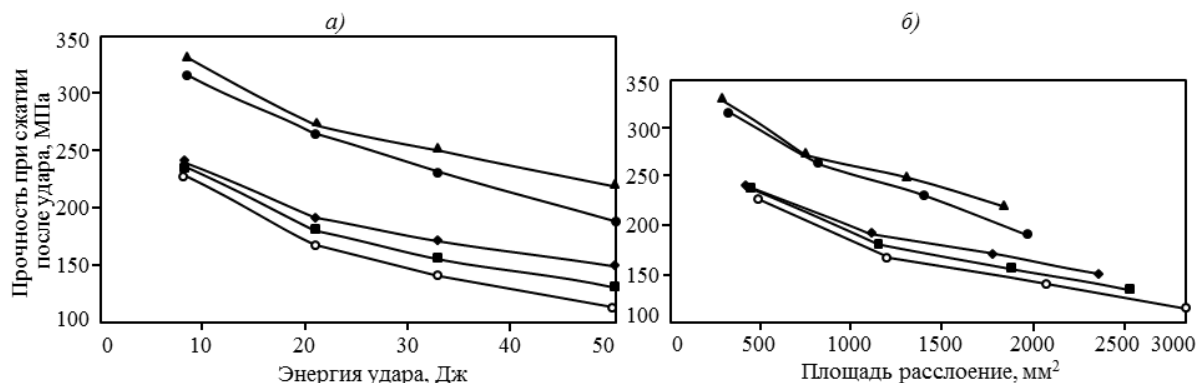


Рис. 2. Зависимости прочности при сжатии после удара от энергии удара (а) и площади расслоения (б) непрошитых (○) и прошитых образцов с линейной плотностью нити 58,8 текс с плотностью прошивки 0,028 (■), 0,111 мм<sup>-2</sup> (●) и 117,6 текс с плотностью прошивки 0,028 (◆), 0,111 мм<sup>-2</sup> (▲)

ясно – повышение прочности связано со снижением области расслоения при ударе или с высокой связывающей межслоевой прочностью прошитых композитов. Зависимость прочности при сжатии после удара от площади расслоения, вызванного ударом, показана на рис. 2, б. Видно, что, по существу, устраняется эффект сокращения области расслаивания из-за прошивки, в результате чего эффект линейной плотности нити прошитых композитов становится очевидным. Ясно, что композиты без прошивки и композиты с низкой плотностью прошивки объединяются в единую линию, особенно когда область расслаивания небольшая. Это значит, что увеличение значений прочности при сжатии после удара для композитов с низкой плотностью прошивки происходит главным образом из-за меньшего расслоения при ударе, и эффект от прошивки незначителен при низких уровнях энергии удара. Влияние прошивки на прочность при сжатии после удара становится немного эффективнее, когда область расслаивания является значительно большей при высоких энергиях удара. Композиты с высокой плотностью прошивки объединяются на графике в отличающуюся от композитов с низкой плотностью прошивки линию, показывающую большое влияние прошивки на повышение прочности при сжатии после удара.

Данными, приведенными на рис. 2, б, подтверждается то, что уже отмечалось ранее (см. рис. 2, а) – влияние толщины нити на прочность становится заметным только при большой площади расслоения, независимо от плотности прошивки.

На рис. 3 продемонстрировано то, что прочность при сжатии после удара возрастает с увеличением плотности стежков прошивки. При больших значениях энергии удара отношение между прочностью при сжатии после удара и плотностью стежков прошивки является линейным. Следует отметить также, что при небольшой энергии удара отношение является линейным только у композитов с высокой плотностью стежков прошивки. Когда значения энергии удара и плотности прошивки низкие, существует небольшое увеличение прочности при сжатии после удара по отношению к прочности образцов без прошивки. Однако при высоких энергиях удара прочность при сжатии у образцов с высокой плотностью прошивки значительно более высокая по сравнению с прочностью непршитых образцов. Это объясняется главным образом тем, что разница в

площади расслоения у образцов различная и влияние прошивки на межслоевую прочность очень велико. Наблюдается также то, что эффект толщины нити является самым существенным, когда энергия удара и плотность стежков прошивки высоки. При снижении энергии удара также уменьшается влияние толщины прошивной нити на прочность образцов. Аналогичным образом толщина прошивной нити имеет меньшее воздействие на прочность при низкой плотности стежков.

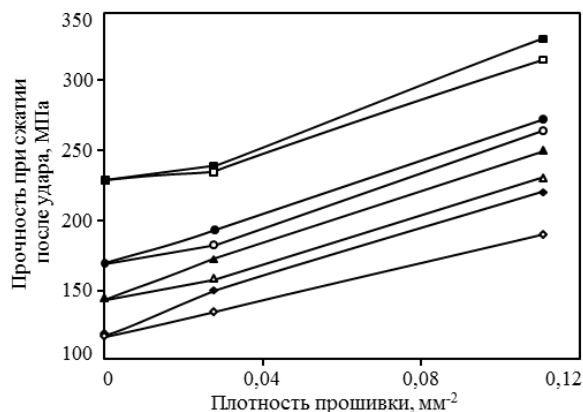


Рис. 3. Зависимость прочности при сжатии после удара от линейной плотности прошивки нити 58,8 текс при энергии удара 8,3 (□), 21 (○), 33 (Δ) и 50 Дж (◇) и 117,6 текс при энергии удара 8,3 (■), 21 (●), 33 (▲) и 50 Дж (◆)

### Заключение

Проведены экспериментальные исследования влияния плотности стежков прошивки и толщины прошивной нити на прочность при сжатии после удара композиционного материала. По результатам испытаний установлено, что композиты с высокой плотностью прошивки имеют высокую прочность при сжатии после удара и высокую стойкость к ударному воздействию. Выявлена также связь между прочностью при сжатии после удара, энергией удара, плотностью прошивки и толщиной прошивной нити. Установлено, что при низких значениях энергии удара прочность при сжатии после удара сильно зависит от плотности стежков прошивки. Однако при высоких энергиях удара прочность при сжатии после удара тесно связана как с плотностью стежков прошивки, так и с толщиной прошивной нити.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
3. Платонов А.А., Коган Д.И., Душин М.И. Изготовление трехмерноармированных ПКМ методом пропитки пленочным связующим //Пластические массы. 2013. №12. С. 56–61.
4. Tan K.T., Watanabe N., Iwahori Y. X-ray radiography and micro computed tomography examination of damage characteristics in stitched composites subjected to impact loading //Composites. B. 2011. V. 42. P. 874–84.

5. Tan K.T., Watanabe N., Iwahori Y. Experimental investigation of bridging law for single stitch fibre using interlaminar tension test //Composite Structures. 2010. V. 92. P. 1399–1409.
6. Mouritz A.P., Cox B.N. A mechanistic interpretation of the comparative in-plane mechanical properties of 3D woven, stitched and pinned composites //Composites. A. 2010. V. 41. P. 709–728.
7. Mouritz A.P., Cox B.N. A mechanistic approach to the properties of stitched laminates //Composites. A. 2000. V. 31. P. 1–27.
8. Scarponi C., Perillo A.M., Cutillo L., Foglio C. Advanced TTT composite materials for aeronautical purposes: compression after impact (CAI) behavior //Composites. B. 2007. V. 38. P. 258–264.
9. Железина Г.Ф. Особенности разрушения органо-пластиков при ударных воздействиях //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 272–277.
10. Zhao N., Hartmut R., Herzberga C. et al. Stitched glass/PP composite. Part I: Tensile and impact properties //Composites. A. 2012. V. 40. P. 635–643.
11. Ерасов В.С., Крылов В.Д., Панин С.В., Гончаров А.А. Испытания полимерного композиционного материала на удар падающим грузом //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 60–64.
12. Хрульков А.В., Душин М.И., Попов Ю.О., Коган Д.И. Исследование и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 292–301.
13. Zhou G. Effect of impact damage on residual compressive strength of glassfibre reinforced polyester (GFRP) laminates //Composite Structures. 1996. V. 35. P. 171–181.
14. Byun J.H., Song S.W., Lee C.H. et al. Impact properties of laminated composites with stitching fibers //Composite Structures. 2006. V. 76. P. 21–27.
15. Beier U., Fischer F., Sandler J.K.W. et al. Mechanical performance of carbon fibre-reinforced composites based on stitched preforms //Composites. A. 2007. V. 38. P. 1655–1663.
16. Caneva C., Olivieri S., Santulli C., Bonifazi G. Impact damage evaluation on advanced stitched composites by means of acoustic emission and image analysis //Composite Structures. 1993. V. 25. P. 121–128.
17. Чурсова Л.В., Душин М.И., Коган Д.И. и др. Пленочные связующие для RFI-технологии //Российский химический журнал. 2010. №1. С. 63–66.
18. Душин М.И., Мухаметов Р.Р., Платонов А.А., Меркулова Ю.И. Исследование фильтрационных характеристик армирующих наполнителей и связующих при разработке технологии безавтоклавного формования полимерных композиционных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 22–25.
19. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 260–265.
20. Бабин А.Н. Связующие для полимерных композиционных материалов нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4 (viam-works.ru).
21. Эпоксидная композиция: пат. 2447104 Рос. Федерация; опубл. 05.10.2010.
22. Эпоксидное связующее, препрег на его основе и изделие, выполненное из него: пат. 2424259 Рос. Федерация; опубл. 22.10.2009.
23. ASTM D 7136/D 7136M. Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. ASTM International. 2007.
24. ASTM D 7137/D 7137M. Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates. ASTM International. 2007.