

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫБОРОЧНОЙ ПРОШИВКИ  
НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА  
С ГИБРИДНЫМ ТЕКСТИЛЬНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ**

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF SELECTIVE STITCHING  
ON STRENGTH PROPERTIES OF COMPOSITE WITH HYBRID TEXTILE FILLER**

*Г.П. ЗАРЕЦКАЯ<sup>1</sup>, Е.М. БАЗАЕВ<sup>1</sup>, Т.В. РУДНЕВА<sup>1</sup>, С.Д. ТОШМАТОВА<sup>1</sup>, А.П. БЕЛОГЛАЗОВ<sup>2</sup>*  
*G.P. ZARETSKAYA<sup>1</sup>, E.M. BAZAEV<sup>1</sup>, T.V. RUDNEVA<sup>1</sup>, S.D. TOSHMATOVA<sup>1</sup>, A.P. BELOGLAZOV<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)  
<sup>2</sup>ООО «Ниагара»

<sup>1</sup>Kosygin Russian State University (Technologies. Design. Art)  
<sup>2</sup>ООО “Niagara”

E-mail: zaretskaya-gp@rguk.ru; bazaevem@mail.ru; rudneva.tv@yandex.ru;  
suraya198415@gmail.com; apb53@inbox.ru

*Прошивка часто применяется для скрепления слоев и деталей преформ с целью фиксации элементов конструкции между собой перед этапом инфузионного формования. Несмотря на то, что при образовании стежка происходит деформация и повреждение волокон иглой, существует возможность увеличить за счет прошивки прочностные показатели при сдвиге, расслоении и растяжении, которые будут превышать потери прочности при проколе. При этом результаты многочисленных исследований в данной области не позволяют сделать однозначные выводы о влиянии прошивки на прочностные свойства композиционных изделий. Целью настоящей работы явилось изучение влияния выборочной прошивки слоистого ленточного композита на прочность при растяжении. В статье представлены результаты испытаний образцов из гибридной ленты, прошитых цепной строчкой. Полученные данные показали, что введение армирующей строчки увеличивает прочность при растяжении на 36,5-49,9%, а также предотвращает расслаивание композита при технологической обработке и приложении нагрузки.*

*Stitching is often used for bonding of preform layers and parts to secure the structural elements to each other before infusion moulding. In spite of the fibre deformation and damage by a needle during stitching, incensement of shear, delamination and tensile strength may exceed the strength losses due to the stitching when the preform is punctured and damaged by a needle. At the same time, the results of numerous studies in this area do not allow to draw unambiguous conclusions about the influence of piercing on the strength properties of composite products. The aim of the present work was to study the influence of selective piercing of a layered tape composite on tensile strength. The paper presents tensile testing results of hybrid tape samples with chain stitching. The obtained data showed that the reinforcing stitching increases the tensile strength by 36,5-49,9% and prevents delamination of the layered composite during technological processing and load application.*

**Ключевые слова:** композиционные материалы, гибридный текстильный наполнитель, выборочная прошивка, прочность при растяжении, расслоение.

**Keywords:** composite materials, hybrid textile filler, selective stitching, tensile strength, delamination.

Исследования прочностных свойств в плоскости неоднократно проводились для различных композитных материалов, армированных углеродными, стеклянными и кевларовыми волокнами, однако мнения о влиянии прошивки на сопротивление разрушению под воздействием разрывной нагрузки расходятся. В ряде работ [1-3] сообщается, что прошивка не оказывает существенного влияния на прочность при растяжении углеволокнистого композита. В некоторых исследованиях отмечается незначительное улучшение свойств при растяжении прошитых преформ [4]. В то же время в других исследованиях сообщается о разных величинах снижения прочностных свойств. Снижение разрывной прочности при прошивке связано с деформацией и разрушением волокон, а также образованием смоляных карманов в местах переплетений верхних и нижних нитей. Кроме того, смещение волокон приводит к значительной концентрации напряжений, поэтому разрушение прошитых образцов, как правило, начинается в области узлов прошивки [2, 5].

Технологические параметры прошивки оказывают влияние на механические характеристики преформы как в плоскости, так и вне плоскости. К наиболее важным технологическим характеристикам относят состав нити, линейную плотность нити, плотность стежка, распределение стежков, тип стежка [6].

Наиболее распространенными типами стежков, используемых для прошивки изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ), являются (рис. 1): модифицированный челночный стежок (а), обычный челночный стежок (б) и цепной стежок (в). Обычный и модифицированный челночные стежки создают концентрацию напряжений из-за изгиба волокон и образования смоляных карманов и снижают свойства преформы в плоскости [6, 7]. Кроме того, при-

меняются другие типы стежков, например, тафтинговый, двойной челночный, выполняемый двумя иглами одновременно, потайной, не требующий доступа к обеим сторонам прошиваемого материала [2, 5, 8].

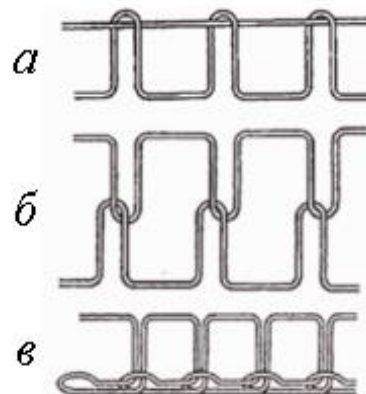


Рис. 1

Прошитые композиты, подвергшиеся ударам, не показали существенной разницы в отношении пиковой силы и поглощенной энергии по сравнению с непрошитыми [9, 11, 12].

Увеличение плотности стежков уменьшает площадь расслоения с 93% до 53% по сравнению с непрошитым аналогом [10]. Уменьшения площади расслоения можно достичь путем увеличения линейной плотности нити или других параметров стежка, таких, как жесткость нити и предварительное натяжение нити. Внеплоскостные свойства полимерного композита могут быть улучшены примерно на 30% без влияния на свойства в плоскости за счет использования для прошивки нескрученных нитей из углеродного волокна с малым количеством филаментов [9, 13].

Различные сочетания перечисленных параметров могут дать разные значения прочностных свойств прошитых преформ в плоскости. Как правило, прошивка приводит к снижению модуля Юнга и прочности

при растяжении до 10% [1, 2]. Ухудшение свойств в плоскости может быть не критичным для деталей, которые в основном подвергаются межслойным напряжениям. Однако для прошитых элементов конструкции с высокими напряжениями в плоскости необходимо учитывать, что прошивка приведет к снижению объемной жесткости и прочности на растяжение. Поэтому при проектировании эффективных 3D-армированных конструкций из ПКМ уделяется пристальное внимание параметрам прошивки [9, 13, 14].

Одним из способов введения прошивки в процесс изготовления конструкционных деталей является разработанная компаниями Boeing, NASA и BBC США технология сборки унифицированных стержневых конструкций на основе прошитого наполнителя, изготовленных методом пултрузионного формования (Pultruded Rod Stitched Efficient Unitized Structure или сокращенно PRSEUS). Выборочная прошивка используется в качестве средства соединения основных конструктивных элементов (обшивки, стрингера и рамы) и заменяет механические соединения посредством заклепок и застёжек [15, 16]. Расслоение является основной формой разрушения в соединениях «внахлест», применяемых в данной технологии сборки, а прошивка показала, что прочность такого соединения увеличивается примерно на 60-175%. Благодаря прошивке элементов конструкции в тех местах, где расслоение является наиболее критичным, снижение прочностных свойств в плоскости сводится к минимуму [16-18].

В последнее время в области производства конструкций из ПКМ наблюдается тенденция замены традиционных тканых армирующих элементов, требующих ручной укладки, ленточными слоистыми материалами. Благодаря псевдоплетеной структуре таких материалов повышается устойчивость к ударным воздействиям и в то же время сохраняется прочность и жесткость традиционных слоистых композитов с разнонаправленной ориентацией слоев. Данные о свойствах ленточных композиционных материалов малочисленны из-за трудностей проведения эксперимента [19].

При армировании многослойных объектов сложной пространственной формы с изменяющейся кривизной поверхности, имеющих соединенные между собой детали, возникает проблема обеспечения равномерной прочности и устойчивой надежности изделия. Решением проблемы может быть усиление участков изделия, наиболее подверженных разрушению, несколькими слоями лент с выборочной прошивкой. Целью настоящей работы явилось изучение влияния выборочной прошивки слоистого ленточного композита на прочность при растяжении.

#### *Материалы и методы*

При проведении данного исследования оценка возможности локального улучшения свойств ленточного композиционного материала проводилась на основе испытаний на прочность при растяжении. Образцы для испытаний изготавливались из гибридной ленты ЛТ-16-6-6-58 Ар-250 шириной 13 мм. Лента вырабатывалась из угольных и арамидных волокон на лентоткацком станке Mageba MN2-70 (Германия) в производственных условиях ООО «Ниагара» (рис. 2).



а)

б)

Рис. 2

Каждый образец состоял из четырех слоев лент толщиной 0,26 мм. Между слоями лент прокладывался термоклеевой материал для предотвращения смещения относительно друг друга в процессе прошивки и последующего формования. Структура образцов представлена на рис. 3.

Всего изготовлено три типа образцов, по пять каждого типа. С прошивкой на машине цепного стежка Inderle 880 изготавливались два типа образцов: с длиной строчки

5 см (К-Н) и 10 см (Д-Н) (рис. 4). При прошивке использовалась арамидная нить Gutermann К 403 (Германия). Для сравнения изготовлены образцы без прошивки (0-Н).

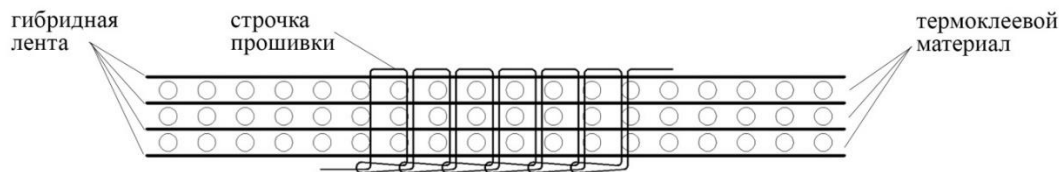


Рис. 3

После прошивки образцы пропитывались методом вакуумного формования (ин-

фузии) эпоксидным связующим и отвердителем Elantas-M.

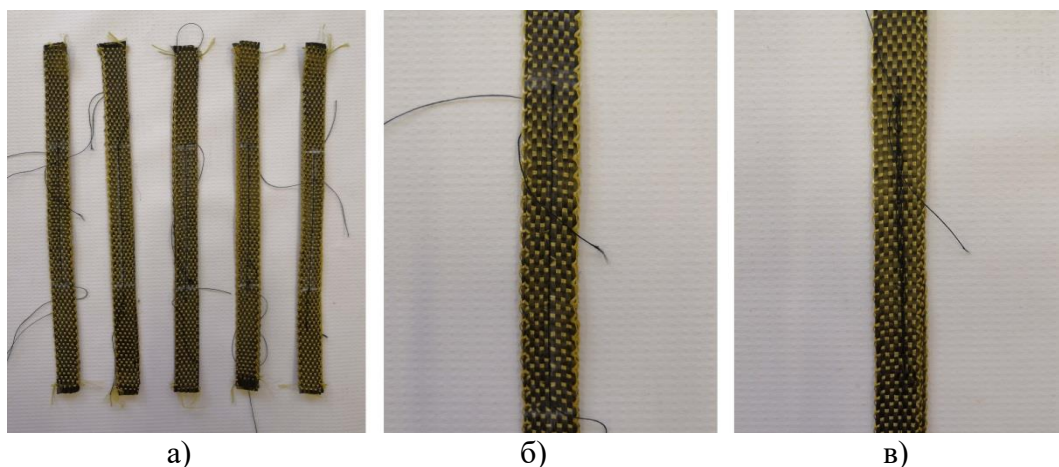


Рис. 4

Изготовление образцов и их испытания на растяжение проводились в соответствии с ГОСТ Р 56785-2015 [20].

#### Результаты и обсуждение

Результаты испытаний представлены в табл. 1. Их анализ показал, что прошивка увеличивает прочность образца при растяжении. В образцах с длиной строчки прошивки 10 см увеличение прочности в среднем составило 49,9%, а в образцах с длиной строчки 5 см – 36,5%.

Образцы после испытаний показаны на рис. 5.



Рис. 5

Т а б л и ц а 1

Тип образца	Разрывное усилие $P_{max}$ , кН	Тип образца	Разрывное усилие $P_{max}$ , кН	Тип образца	Разрывное усилие $P_{max}$ , кН
0-1	15,51	Д-1	23,81	К-1	22,00
0-2	15,81	Д-2	24,62	К-2	24,45
0-3	19,92	Д-3	22,09	К-3	18,11
0-4	12,37	Д-4	24,27	К-4	23,37
0-5	15,26	Д-5	23,44	К-5	19,74

Как видно на представленном рисунке, разрушение образцов с прошивкой происходило ближе к зажимам, в то время как в местах прошивки разрушения не наблюдалось. Кроме того, в прошитых образцах не происходило расслоения при воздействии разрывной нагрузки, в отличие от образцов без прошивки (рис. б).



Рис. 6

Анализ картины разрушений образцов позволяет сделать вывод о том, что за счет соединения слоев лент прошивкой в продольном направлении нагрузка распределялась одновременно на все слои, в отличие от непршитых образцов, где каждый слой лент работал по отдельности, в результате чего происходило расслоение при растягивающем усилии.

## ВЫВОДЫ

В результате исследований установлено, что выборочная прошивка слоистого ленточного композита цепной строчкой улучшает показатели прочности при растяжении и препятствует расслаиванию при технологической обработке и приложении нагрузки за счет введения сквозной армирующей строчки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Mouritz A.P., Cox B.N. A mechanistic approach to the properties of stitched laminates // Composites Part A: Applied Science Manufacturing, 2000, 31. Pp. 1...27.
2. Mouritz A.P., Leong K.H., Herzberg I. A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites // Composites Part A: Applied Science Manufacturing, 1997, 28. Pp. 1979...991.
3. Zhao N., Rödel H., Herzberg C., Gao Shang-Lin, Krzywinski S. Stitched glass/PP composite. Part I: Tensile and impact properties // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, 40. Pp. 635...643.
4. Zheng Y., Xiaoquan C., Yasir B. Effect of Stitching on Plain and Open-hole Strength of CFRP Laminates // Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25. Pp. 473...484.

5. Saboktakin A. 3D Textile Preforms And Composites For Aircraft Structures: A Review // International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, 2019, 6(1). – <https://commons.erau.edu/ijaaa/vol6/iss1/2/>
6. Dransfield K., Baillie C., Mai Y-W. Improving the delamination resistance of CFRP by stitching – a review // Composites Science and Technology, 1994, Vol. 50, No 3. Pp. 305...317.
7. Scarponi C., Perillo A.M., Cuttillo L., et al. Advanced TTT composite materials for aeronautical purposes: compression after impact (CAI) behaviour // Composites Part B: Engineering, 2007, Vol. 38, No 2. Pp. 258...264.
8. Sağlam G., Bedeloğlu A. Mechanical properties of thermoplastic filament stitched carbon fiber reinforced composites // Journal of Innovative Science and Engineering, 2022, 6(2). Pp. 248...258.
9. Drake D.A., Sullivan R.W., Lovejoy A.E., Clay S.B., Jegley D.C. Influence of stitching on the out-of-plane behavior of composite materials – A mechanistic review // Journal of Composite Materials. 2021, 55(23). Pp. 3307...3321.
10. Karahan M., Ulcay Y., Karahan N., Kus A. Influence of Stitching Parameters on Tensile Strength of Aramid/Vinyl Ester Composites // Materials Science, 2013, 19. Pp. 67...72.
11. Платонов А.А. Полимерные композиционные материалы на основе прошитого наполнителя с повышенной ударостойкостью // Авиационные материалы и технологии. 2014. №4. – [https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2014/2014\\_4\\_7\\_1.pdf](https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2014/2014_4_7_1.pdf)
12. Lai J., Peng Z., Huang Z., Li M., Mo M., Liu B. Effect of Stitching, Stitch Density, Stacking Sequences on Low-Velocity Edge Impact and Compression after Edge Impact (CAEI) Behavior of Stitched CFRP Laminates // Materials, 2022, 15(24). – <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/24/8822>
13. Yudhanto A., Lubineau G., Ventura I.A., Watanabe N., Iwahori Y., Hoshi H. Damage characteristics in 3D stitched composites with various stitch parameters under in-plane tension // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 71. Pp. 17...31.
14. Mouritz A.P., Cox B.N. A mechanistic interpretation of the comparative in-plane mechanical properties of 3D woven, stitched and pinned composites // Composites Part A: Applied Sciences and Engineering, 2010, 41. Pp. 709...728.
15. Velicki A., Jegley D. PRSEUS Structural Concept Development // AIAA 2014-0259, 52nd Aerospace Sciences Meeting, 2014. – <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20140003950/downloads/20140003950.pdf>
16. Jegley D.C. Improving strength of postbuckled panels through stitching // Composite Structures, 2007, 80. Pp. 298...306.
17. Aymerich F., Onnis R., Priolo P. Analysis of the fracture behaviour of a stitched single-lap joint // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36. Pp. 603...614.

18. Han X.P., Li L., Zhu X.P., Yue Z.F. Experimental study on the stitching reinforcement of composite laminates with a circular hole // *Composites Science and Technology*, 2008, 68. Pp. 1649...1653.

19. Rad C.V., Thomas F.D., Seay B., Van Tooren M.J.L. Manufacturing and characterization of novel clutch non-conventional fiber-reinforced composite laminates // *Composite Structures*, 2019, Vol. 215. Pp. 454...470.

20. ГОСТ Р 56785-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов. М.: Стандартинформ, 2016. 20 с.

## REFERENCES

1. Mouritz A.P., Cox B.N. A mechanistic approach to the properties of stitched laminates // *Composites Part A: Applied Science Manufacturing*, 2000, 31. Pp. 1...27.

2. Mouritz A.P., Leong K.H., Herzberg I. A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites // *Composites Part A: Applied Science Manufacturing*, 1997, 28. Pp. 1979...991.

3. Zhao N., Rödel H., Herzberg C., Gao Shang-Lin, Krzywinski S. Stitched glass/PP composite. Part I: Tensile and impact properties // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009, 40. Pp. 635...643.

4. Zheng Y., Xiaoquan C., Yasir B. Effect of Stitching on Plain and Open-hole Strength of CFRP Laminates // *Chinese Journal of Aeronautics*, 2012, 25. Pp. 473...484.

5. Saboktakin A. 3D Textile Preforms And Composites For Aircraft Structures: A Review // *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 2019, 6(1). – <https://commons.erau.edu/ijaaa/vol6/iss1/2/>

6. Dransfield K., Baillie C., Mai Y-W. Improving the delamination resistance of CFRP by stitching – a review // *Composites Science and Technology*, 1994, Vol. 50, No 3. Pp. 305...317.

7. Scarponi C., Perillo A.M., Cuttillo L., et al. Advanced TTT composite materials for aeronautical purposes: compression after impact (CAI) behaviour // *Composites Part B: Engineering*, 2007, Vol. 38, No 2. Pp. 258...264.

8. Sağlam G., Bedeloğlu A. Mechanical properties of thermoplastic filament stitched carbon fiber reinforced composites // *Journal of Innovative Science and Engineering*, 2022, 6(2). Pp. 248...258.

9. Drake D.A., Sullivan R.W., Lovejoy A.E., Clay S.B., Jegley D.C. Influence of stitching on the out-of-plane behavior of composite materials – A mechanistic review // *Journal of Composite Materials*. 2021, 55(23). Pp. 3307...3321.

10. Karahan M., Ulcay Y., Karahan N., Kus A. Influence of Stitching Parameters on Tensile Strength of Aramid/Vinyl Ester Composites // *Materials Science*, 2013, 19. Pp. 67...72.

11. Platonov A.A. Polymer composite materials based on stitched filler with increased impact resistance // *Aviation materials and technologies*, 2014, 4. Retrieved from: [https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2014/2014\\_4\\_7\\_1.pdf](https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2014/2014_4_7_1.pdf)

12. Lai J., Peng Z., Huang Z., Li M., Mo M., Liu B. Effect of Stitching, Stitch Density, Stacking Sequences on Low-Velocity Edge Impact and Compression after Edge Impact (CAEI) Behavior of Stitched CFRP Laminates // *Materials*, 2022, 15(24). Retrieved from: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/24/8822>

13. Yudhanto A., Lubineau G., Ventura I.A., Watanabe N., Iwahori Y., Hoshi H. Damage characteristics in 3D stitched composites with various stitch parameters under in-plane tension // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 71. Pp. 17...31.

14. Mouritz A.P., Cox B.N. A mechanistic interpretation of the comparative in-plane mechanical properties of 3D woven, stitched and pinned composites // *Composites Part A: Applied Sciences and Engineering*, 2010, 41. Pp. 709...728.

15. Velicki A., Jegley D. PRSEUS Structural Concept Development // AIAA 2014-0259, 52nd Aerospace Sciences Meeting, 2014. Retrieved from: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20140003950/downloads/20140003950.pdf>

16. Jegley D.C. Improving strength of postbuckled panels through stitching // *Composite Structures*, 2007, 80. Pp. 298...306.

17. Aymerich F., Onnis R., Priolo P. Analysis of the fracture behaviour of a stitched single-lap joint // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2005, 36. Pp. 603...614.

18. Han X.P., Li L., Zhu X.P., Yue Z.F. Experimental study on the stitching reinforcement of composite laminates with a circular hole // *Composites Science and Technology*, 2008, 68. Pp. 1649...1653.

19. Rad C. V., Thomas F. D., Seay B., Van Tooren M. J. L. Manufacturing and characterization of novel clutch non-conventional fiber-reinforced composite laminates // *Composite Structures*. 2019. Vol. 215. Pp. 454...470.

20. GOST R 56785-2015. Polymer composites. Tensile test method for flat samples. Moscow: Standartinform, 2016. 20 p.

Рекомендована кафедрой художественного моделирования, конструирования и технологии швейных изделий РГУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 11.10.23.