

Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-197-208

## ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ И ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАНСВЕРСАЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ОБРАЗЦОВ СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ

Е.А. Васильчук<sup>1</sup>, А.М. Губин<sup>1</sup>, И.Н. Гуляев<sup>1</sup>, О.Н. Клименко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Представлены особенности изготовления, подготовки к испытаниям и проведения испытаний образцов слоистых углепластиков на определение трансверсальной прочности при растяжении. Описаны особенности выкладки толстостенных плит, характерные повреждения структуры материала при изготовлении образцов, а также влияние дефектов структуры на получаемые значения прочности при испытаниях. Показаны различия в образцах и их разрушении. В настоящее время продолжается работа в направлении совершенствования методов испытаний слоистых углепластиков для наиболее полного описания свойств полимерных композиционных материалов.

**Ключевые слова:** полимерный композиционный материал, углепластик, трансверсальная прочность, механические испытания

**Для цитирования:** Васильчук Е.А., Губин А.М., Гуляев И.Н., Клименко О.Н. Особенности подготовки и проведения испытаний на определение трансверсальной прочности при растяжении образцов слоистых углепластиков // Труды ВИАМ. 2026. № 1 (155). С. 197–208. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-197-208.

Scientific article

## FEATURES OF PREPARATION AND CONDUCTING TESTS TO DETERMINE THE TRANSVERSE TENSILE STRENGTH OF SAMPLES OF LAMINATED CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS

E.A. Vasilchuk<sup>1</sup>, A.M. Gubin<sup>1</sup>, I.N. Gulyaev<sup>1</sup>, O.N. Klimenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The article presents the features of manufacturing, preparation for testing and testing of samples of layered carbon fiber reinforced plastics for transverse tensile strength. The features of laying out thick-walled plates and typical damage to the structure of the material during the manufacture of samples, as well as their influence of structural defects on the values obtained during testing are described. Differences in samples and their destruction are shown. At present, the Institute continues to improve the methods of testing layered carbon fiber reinforced plastics for the most complete description of the properties of PCM.

**Keywords:** polymer composite material, carbon fiber reinforced plastic, transverse strength, mechanical testing

**For citation:** Vasilchuk E.A., Gubin A.M., Gulyaev I.N., Klimenko O.N. Features of preparation and conducting tests to determine the transverse tensile strength of samples of laminated carbon fiber reinforced plastics *Trudy VIAM*, 2026, no. 1 (155), pp. 197–208. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-197-208.

### **Введение**

В настоящее время авиационная промышленность нуждается в материалах, которые обеспечивают минимальную массу изделия при высоких прочностных характеристиках, которые сохраняются в условиях эксплуатации под воздействием различных нагрузок. Поэтому в современной авиационной промышленности широкое применение находят полимерные композиционные материалы (ПКМ), в частности углепластики. Углепластики имеют низкую плотность, высокие показатели прочности, могут эксплуатироваться в агрессивных средах, в зависимости от типа полимерной матрицы могут выдерживать высокие температуры при различных типах нагрузки [1]. При разработке изделий из ПКМ учитываются свойства анизотропии материала. В отличие от материалов гомогенной природы прочностные свойства слоистых углепластиков отличаются в разных направлениях (не только  $x$  и  $y$ , но и  $z$ ) и могут достигать нескольких порядков. Поэтому важно учитывать особенности работы трехмерной конструкции в условиях всестороннего нагружения. Слоистые ПКМ наименее устойчивы к воздействию сдвиговых нагрузок относительно других видов воздействия, действующих на них [2], что подтверждается при детальном изучении зоны излома [3]. Это объясняется тем, что принцип армирования таких материалов предполагает их работу в направлении осей армирования. Остальные аспекты прочности, которые не имеют первостепенного значения, должны позволять сохранять несущую способность при большем времени эксплуатации без ущерба для основных прочностных характеристик.

В условиях создания конструкций с переменной толщиной из ПКМ необходимо правильно рассчитать их надежность и предельные значения прочности. Для этого необходимо иметь полную матрицу тензорных коэффициентов, которые являются физическими постоянными и в подавляющем большинстве случаев определяются экспериментально. Для слоистых ПКМ важной является задача определения прочности в направлении толщины набора слоев (в трансверсальном направлении).

Разработка методов определения прочности в направлении толщины конструкции ведется довольно давно, однако из-за трудоемкого подготовительного процесса первый отечественный стандарт ГОСТ Р 57864 появился только в 2017 г., а введен в действие в 2018 г. До этого времени исследователи пользовались другой методологией оценки прочности: методикой определения предельного касательного напряжения при межслойном сдвиге, определением упругих характеристик при сдвиге в плоскости (при отборе образцов с рабочей плоскостью  $xz$  или  $yz$ ). Для оценки нормального напряжения, действующего в трансверсальном направлении, пользовались методами косвенной оценки – испытанием на растяжение плоских образцов однонаправленного углепластика, вырезанных под углом 90 градусов к направлению армирования, а также на растяжение образцов отливок полимерной матрицы. Ключевой фактор, ограничивающий поперечные свойства, – слабая когезионная прочность полимерной матрицы, которая становится критичной при наличии концентраторов напряжений (углы, дефекты) [4–8].

Прочность однонаправленного слоя углепластика определяется пределами прочности при растяжении и сжатии вдоль и поперек волокон и при сдвиге в плоскости слоя. Исчерпание несущей способности материала при продольном растяжении происходит в результате разрыва волокон, а при сжатии – в результате потери устойчивости волокон или образования трещины, параллельной волокнам [9]. Разрушение при растяжении поперек волокон и при сдвиге связано, как правило, с разрушением матрицы (нарушение когезионной прочности) или с отслоением матрицы от волокон (нарушение адгезионной прочности). Разрушение при сжатии поперек волокон происходит в результате скола материала под углом к направлению нагружения. Разрушение композитов даже при одноосном нагружении является комплексным процессом, теоретическое описание которого связано с большими трудностями. Поэтому наибольшее распространение получили экспериментальные методы определения пределов прочности [10].

Прочность при продольном растяжении и сжатии определяется на плоских образцах или кольцах с однонаправленным армированием. При растяжении и сжатии поперек волокон используют плоские образцы с поперечным армированием или трубки с кольцевыми волокнами [11–13]. Предел прочности при сдвиге определяют при кручении таких трубок. Слой однонаправленного материала, работая в составе многослойного материала [14], как правило, испытывает воздействие всех трех напряжений:  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\tau_{12}$ . Поэтому необходимо иметь критерий прочности, по которому можно прогнозировать разрушение материала на основе имеющихся данных о разрушении и свойствах композита, полученных при простых опытах – растяжении, сжатии, сдвиге. Существующие критерии прочности имеют в основном феноменологический характер, т. е. представляют собой аналитическую аппроксимацию экспериментальных результатов. В связи с тем, что такая аппроксимация может осуществляться неоднозначно, а степень ее соответствия экспериментальным результатам, имеющим, как правило, значительный разброс, оценивается субъективно, существует множество таких критериев.

Моделями микромеханики установлено соотношение  $\sigma_{\text{попер}} \approx 0,6\sigma_{\text{матрицы}}$ . В отличие от цилиндрических профилей, квадратные сечения создают зоны повышенных напряжений в углах, что усиливает деформацию матрицы, инициирует преждевременное разрушение даже при низких нагрузках, а также требует учета трехмерного распределения напряжений. При поперечном растяжении квадратного стержня из углепластика максимальные напряжения локализуются в углах (конечно-элементный анализ показывает рост  $\sigma_{\text{угол}}/\sigma_{\text{центр}} \approx 1,5\text{--}2$ ). Разрушение начинается с образования микротрещин в матрице, которые быстро распространяются вдоль границ волокон [15].

Модель слабого звена предполагает, что напряжения передаются через сдвиговые деформации матрицы вблизи волокон. Формула для определения трансверсального напряжения:

$$\sigma_{\text{транс}} = \tau_{\text{адгез}} \cdot l/d,$$

где  $\tau_{\text{адгез}}$  – адгезионная прочность при сдвиге;  $l$  – длина передачи нагрузки;  $d$  – диаметр волокна.

Адгезионную прочность можно записать через критическое напряжение разрушения интерфейса ( $\sigma_{\text{кр}}$ ):

$$\sigma_{\text{транс}} \leq \sigma_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2E_{\text{м}}G_{\text{адгез}}}{\pi d}},$$

где  $E_{\text{м}}$  – модуль упругости матрицы;  $G_{\text{адгез}}$  – энергия адгезионного разрушения.

### Материалы и методы

В качестве исследуемых материалов выбраны углепластики на основе углеродного жгута и эпоксидной матрицы, а также на основе равнопрочного тканого армирующего наполнителя саржевого переплетения с той же эпоксидной матрицей.

Из выбранных материалов изготовлены образцы углепластиков высотой от 20 до 40 мм. Исследовали образцы как из каждого материала в отдельности, так и образцы с комбинированной укладкой (применение однонаправленного армирующего наполнителя и тканого армирующего наполнителя с определенной схемой укладки, реализованной совместно).

На станке с ЧПУ изготавливали образцы нескольких типов: в виде правильной четырехугольной призмы с уменьшенной площадью поперечного сечения в рабочей зоне и скругленными переходными зонами от основания к рабочей зоне (рис. 1, а–в), а также упрощенной геометрической формы с уменьшенной рабочей зоной с двумя плоскими параллельными гранями и двумя гранями, имеющими уменьшенный радиус в рабочей зоне (рис. 1, г). Образцы, представленные на рис. 1, а–в, различались способом

изготовления. Так, образцы *б* и *в* изготовлены без дополнительной механической обработки верхней и нижней граней, а образец *а* – с дополнительной обработкой для уменьшения высоты образца. При этом образец *б* имеет отличия по высоте оснований для крепления испытательной оснастки.

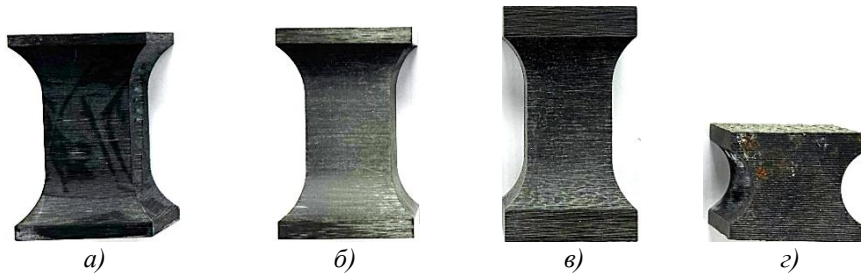


Рис. 1. Типы образцов, изготовленных из толстостенных плит

Образцы изготавливали из толстостенных плит толщиной от 20 до 40 мм. Толстостенные плиты выкладывали послойно из препрега с определенной схемой укладки. Отверждение собранного пакета осуществлялось автоклавным методом формования по многоступенчатому режиму с конечной температурой формования 180 °С.

Для оценки целостности изготовленной плиты для исключения внутренних дефектов проводили ультразвуковой контроль ручным теневым методом.

Теневой метод (амплитудный метод прохождения) основан на регистрации уменьшения амплитуды прошедшего сигнала под влиянием дефекта, затрудняющего прохождение сигнала и создающего звуковую тень. С-скан одной из изготовленных толстостенных плит представлен на рис. 2.

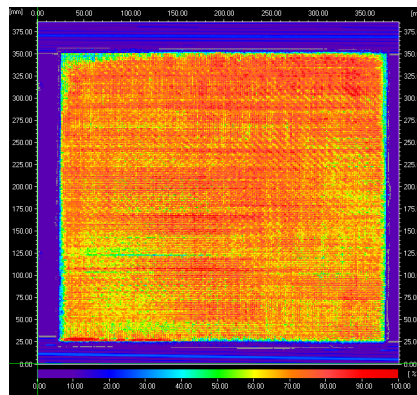


Рис. 2. С-скан ультразвукового контроля толстостенной плиты углепластика

Испытания образцов проводили по методикам в соответствии с ГОСТ Р 57864–2017 «Композиты полимерные. Метод определения предела прочности и модуля упругости при растяжении в направлении толщины образца» и ASTM D7291/D7291M «Метод испытания волокнистого композиционного материала с полимерной матрицей для определения модуля упругости и предела прочности на разрыв».

### ***Особенности изготовления образцов углепластиков для испытаний на трансверсальную прочность при растяжении***

Для изготовления образцов по определению физико-механических характеристик в направлении толщины образца используют толстостенные изделия, изготовленные методом послойной выкладки, – плоские плиты толщиной от 20 до 42 мм.

Толстостенные плиты перед послойной выкладкой предварительно вакуумировали – это важная и необходимая стадия как при выкладке, так и по окончании сборки пакета. Данная стадия необходима для достижения монолитной и беспористой структуры углепластика. Вакуумирование осуществляли после каждого 40-го слоя путем сборки вакуумного мешка. Продолжительность вакуумирования составляла 15–20 мин. При выкладке плит с большим количеством слоев можно проводить вакуумирование заготовок при повышенной температуре в прессе или в автоклаве при избыточном давлении.

Отверждение собранного пакета осуществляли методом автоклавного формования по многоступенчатому режиму для материала, из которого изготовлена толстостенная плита. Качество изготовленной плиты подтверждали физическими испытаниями, а именно: определяли плотность методом гидростатического взвешивания, объемную пористость углепластика и содержание связующего в изготовленной плите. Для подтверждения полного отверждения плиты определяли степень превращения связующего в углепластике.

Исследования показали, что изготовленные плиты имели следующие характеристики: плотность углепластика – от 1,520–1,540 г/см<sup>3</sup>, массовая доля связующего – от 30 до 37 %, объемная пористость углепластика – менее 2 %, степень превращения связующего в углепластике 99 %.

Для изготовления образцов было необходимо подобрать технологию резки с учетом особенностей материала. При резке углепластиков необходимо учитывать такие особенности, как слоистая структура, твердость и тип армирования. Поскольку углепластики обладают анизотропной структурой, механическая обработка методом резки требует учета большого количества факторов при изготовлении изделий сложной геометрической конфигурации, особенно при обработке в направлении толщины образца. Следует выбирать качественный режущий инструмент, отдавая предпочтение инструменту с алмазным покрытием режущих кромок. Это обусловлено высокой стойкостью волокон к абразивному материалу режущего инструмента. Плохое качество резки и обработки образцов приводит к деламинации и внутренним расслоениям получаемых образцов, которые снижают механические характеристики. Рекомендуется изготавливать образцы из толстостенных изделий методом фрезеровки на низких скоростях, особенно в случае применения однонаправленного армирующего наполнителя. Такой материал более чувствителен к появлению дефектов во время резки. Достичь высокого качества резки можно с помощью станка с ЧПУ, который обеспечивает высокую точность реза. Кроме параметров скорости (частоты) вращения фрезы, важно не допускать чрезмерного перегрева режущего инструмента и предусматривать своевременную подачу смазочно-охлаждающей жидкости [16, 17].

Изготовление образцов из толстостенных изделий возможно с помощью гидроабразивной резки. Данная технология заключается в воздействии струи воды, смешанной с абразивным материалом, которая подается под высоким давлением на высокой скорости. Данный метод не вызывает повышения температуры в зоне реза, что исключает оплавление краев и деструкцию материала [18]. Недостаток такой технологии заключается в том, что резка толстостенных изделий возможна до толщины 30 мм.

Помимо видов резки, описанных ранее, также применяются лазерная и ультразвуковая резки. Но данные методы имеют ряд существенных недостатков, которые приводят к деструкции материала, быстрому износу режущего инструмента, а также отличаются высокой стоимостью и невозможностью корректной оценки свойств исходного материала [19].

Дефекты, возникающие при изготовлении образцов на стадии резки, довольно распространенная проблема. Такие дефекты можно обнаружить как визуально, так и с помощью методов неразрушающего контроля. Как уже упоминалось ранее, слоистые углепластики очень чувствительны к высоким скоростям механической обработки. При некорректном выборе скорости резки или при использовании фрезы с высокой степенью износа образуются повреждения обрабатываемой поверхности в виде глубоких борозд в направлении толщины, выкрашивания полимерной матрицы и трещин (рис. 3).

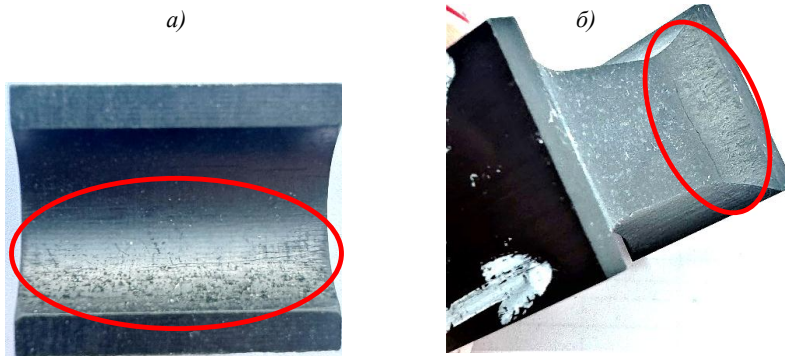


Рис. 3. Виды дефектов при резке с использованием фрезы с высокой степенью износа (а) и видимое расслоение после резки (б)

Помимо видимых трещин, с помощью методов неразрушающего контроля (компьютерной томографии и капиллярного метода) можно выявить внутренние расслоения, которые возникли во время резки, но не определены визуально. На рис. 4 представлены изображения структуры образца углепластика, полученные методом компьютерной томографии, а также изображение в ультрафиолетовом излучении образца с нанесенной индикаторной (пенетрантной) жидкостью.

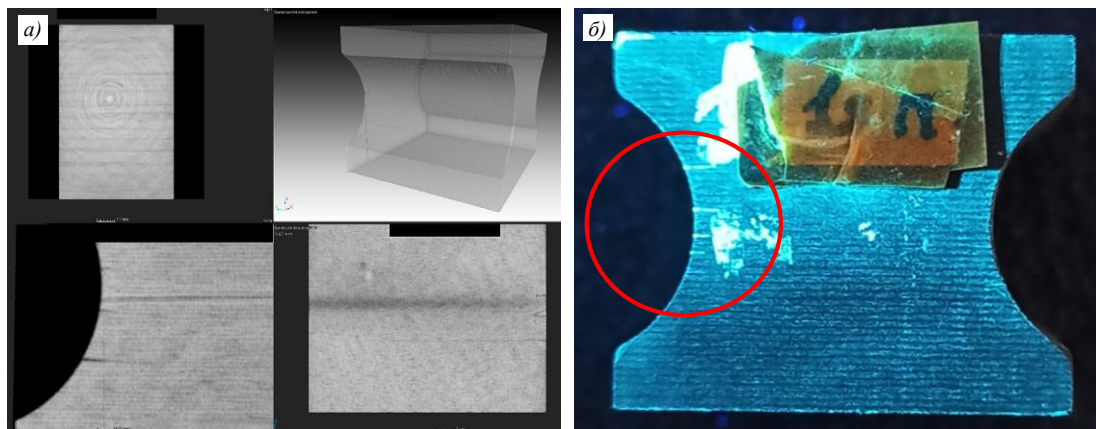


Рис. 4. Изображения образца с внутренними расслоениями, полученные методом компьютерной томографии (а) и капиллярным методом (б)

***Особенности подготовки образцов углепластиков к проведению испытаний на определение трансверсальной прочности при растяжении***

Для проведения испытаний по оценке характеристик при растяжении в направлении толщины образца необходимо приклеить к нему оснастку. Оснастка – это нагружающий блок, дополненный шпильками с резьбой, ответная часть которой вкручивается в шарнирный блок оснастки на испытательной машине.

Перед приклейкой соединяемые поверхности оснастки и образца предварительно подвергают пескоструйной обработке или обработке шлифовальной бумагой с грубым абразивом. Такая обработка необходима для увеличения адгезии клея к поверхностям оснастки и приклеиваемого образца. После механической обработки оснастку и образец необходимо очистить от мелкодисперсных частиц с помощью мягкой салфетки или сжатого воздуха.

В зависимости от температуры испытаний и прочности материала выбирают клеи горячего или холодного отверждения. Клей должен иметь предел прочности при сдвиге клеевого соединения больше, чем прочность исследуемого образца. Для увеличения прочности клеевого соединения нагружающих блоков с образцом допускается применение накладок. На рис. 5 приведена схема приклейки образца к металлическим нагружающим блокам.

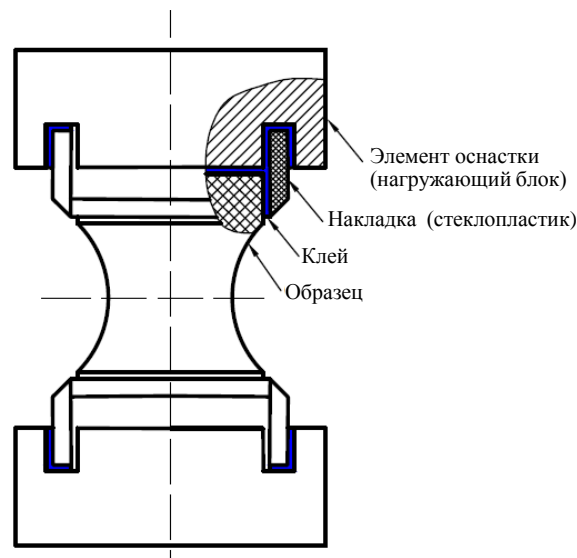


Рис. 5. Схема приклейки образца к металлическим нагружающим блокам

После завершения подготовки поверхности углепластика и оснастки образцы собирали и отверждали по режиму выбранного клея, для чего образцы помещали в специализированную оснастку. После отверждения образцы имели вид, представленный на рис. 6.

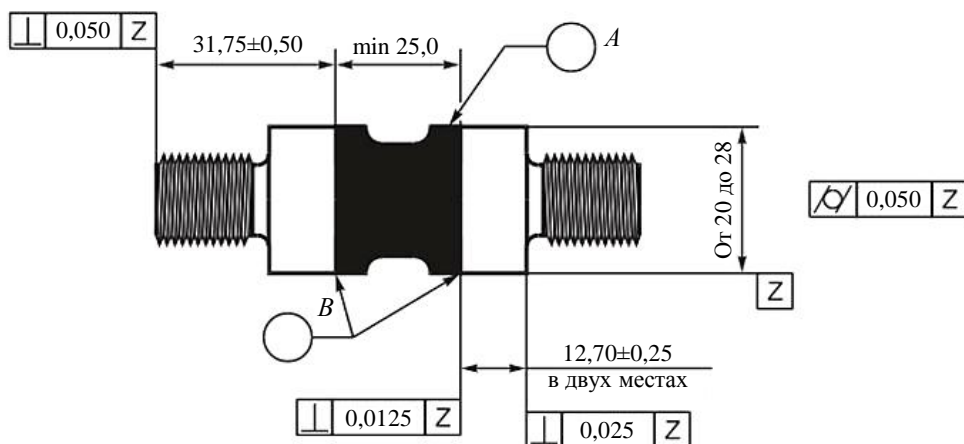


Рис. 6. Вид образца, вклеенного в систему блоков-шпилек, подготовленного для испытаний [20]

### Результаты и обсуждение

Испытания проводили на испытательной машине, оснащенной подвижной траверсой с аттестованным датчиком силы 0,5 класса точности (до 10 и до 100 кН), скорость перемещения подвижного захвата регламентировалась технической документацией и соответствовала стандарту на проведение испытаний. Деформацию оценивали с помощью тензорезистивных датчиков, наклеенных непосредственно на грани образца в рабочей зоне. Запись данных по каналам деформации проводили с помощью многоканального коммутатора с синхронизацией по времени с перемещением траверсы.

При испытаниях образцов с квадратным сечением в рабочей зоне, имеющей участок с постоянным поперечным сечением (рис. 1, а), где высоту образца получали путем механической обработки фрезой верхней и нижней граней, выявлено, что у большинства образцов разрушение происходило не в рабочей зоне (в основании образца) из-за отслоения верхних слоев. Осмотр поверхности разрушения показал, что при механической обработке поверхности граней (путем уменьшения высоты) нарушалась сплошность композиционного материала и клеевой состав проникал в первые несколько поврежденных слоев, поэтому разрушение происходило по самому слабому месту, а именно по верхним слоям углепластика. Такое разрушение считается некорректным.

Вид разрушения образцов, которые подвергались механической обработке с помощью фрезы, представлен на рис. 7.

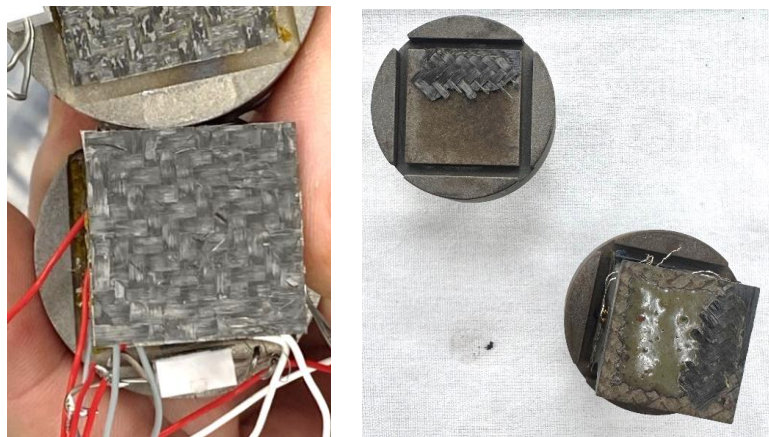


Рис. 7. Вид разрушения образцов, которые подвергались механической обработке

При испытаниях образцы, представленные на рис. 1 б, в, разрушались корректно – в рабочей зоне, отслаивания слоев углепластика от оснастки не наблюдалось. Вид такого разрушения представлен на рис. 8.

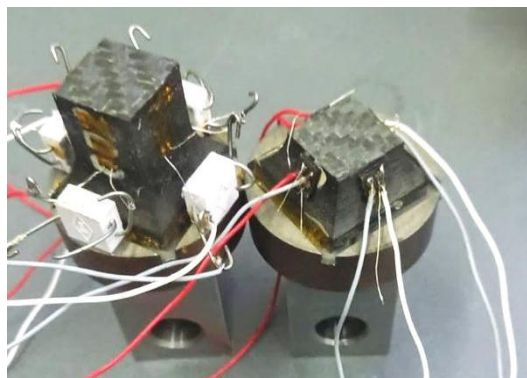


Рис. 8. Вид испытанного образца, разрушенного в рабочей зоне

На рис. 9 представлен образец с тензодатчиками, установленный в испытательную машину, для определения предела прочности и модуля упругости при поперечном растяжении.



Рис. 9. Вид образца, подготовленного к определению физико-механических параметров

Образцы с постоянным поперечным сечением и высотой более 38 мм имели меньшее количество дефектов или дефекты отсутствовали. Прочность таких образцов составила от 18,3 до 23,9 МПа – на основе однонаправленного армирующего наполнителя и 22,8 до 28,3 МПа на образцах на основе тканого наполнителя.

Большая часть дефектов наблюдалась на образцах с комбинированной укладкой и упрощенной геометрической формой образца (рис. 1, 2), а именно: с двумя плоскими параллельными гранями и двумя гранями, имеющими уменьшенный радиус рабочей зоны. Несмотря на корректное разрушение, в области рабочей зоны, представленной на рис. 10, видно, что разрушение происходит по месту образовавшейся трещины. Такие образцы имеют сниженную прочность – в диапазоне от 14,1 до 16,9 МПа. На данном типе образца отсутствует зона с постоянным поперечным сечением, в связи с этим измерение модуля упругости и относительного удлинения на таких образцах некорректно.

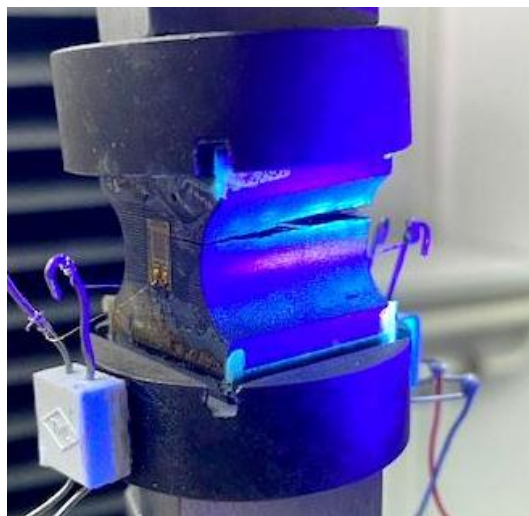


Рис. 10. Разрушение образца по месту дефекта

### Заключения

Рассмотрены несколько типов образцов, изготовленных из толстостенных плит и предназначенных для определения прочности при растяжении в трансверсальном направлении. Исходя из геометрической формы образцов, показанных на рис. 1, можно сделать вывод, что упрощенная геометрическая форма образца (рис. 1, *з*) не позволяет определять модуль упругости и относительное удлинение корректно, в отличие от остальных типов образцов.

Рекомендуется изготавливать образцы из толстостенных изделий методом фрезерования при низких скоростях на станках с ЧПУ, которые обеспечивают высокую точность реза и качество изготавливаемых образцов.

Для увеличения адгезии клея к поверхностям оснастки и приклеиваемого образца необходимо предварительно подвергать поверхности пескоструйной обработке или обработке шлифовальной бумагой с грубым абразивом.

Выявлено, что механическая обработка верхней и нижней граней фрезой для уменьшения высоты образца приводит к разрушению не в рабочей зоне (в основании образца) из-за отслоения верхних слоев.

### Список источников

1. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Механические испытания и свойства конструкционных авиационных металлических материалов: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 344 с.
2. Гольденблат И.И., Копнов В.А. Критерий прочности анизотропных материалов // Механика. 1965. № 6. С. 77–83.
3. Левин В.Е., Лапердина Н.А., Олегин И.П. Численный подход в определении упругих свойств однонаправленно армированных композитов // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 11. С. 141–145.
4. Гунаяева А.Г., Курносоев А.О., Славин А.В. Опыт применения полимерных композиционных материалов разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в двигательных установках для самолетов гражданского назначения // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 4 (77). С. 82–94. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.03.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-82-94.
5. Шершак П.В., Яковлев Н.О., Сутубалов А.И. Стандарты по испытаниям полимерных композиционных материалов. Часть 1. Растяжение // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). С. 152–166. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-152-166.
6. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиационного назначения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). С. 122–144. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 09.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
7. Сутубалов А.И., Подживотов Н.Ю., Шершак П.В., Яковлев Н.О. Оценка однородности физико-механических свойств полуфабрикатов авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 1 (74). С. 121–135. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-121-135.
8. Hancox N.L. The compression strength of unidirectional carbon fibre reinforced plastic // Journal of materials science. 1975. Vol. 10. P. 234–242. DOI: 10.1007/BF00540347.
9. Берков Н.А., Архангельский А.И., Архангельская М.В. Нелинейный анализ соединения композитных оболочек // Новые технологии высшей школы. Наука, техника, педагогика. М.: Московский политех, 2021. С. 113–119.
10. Пятаев С.Ф. Влияние температуры на прочность линейно-армированных боропластиков при сложном нагружении // Журнал Сибирского федерального университета. Сер.: Математика и физика. 2012. Т. 5 (2). С. 246–255.

11. Lee S., Waas A.M. Compressive response and failure of fiber reinforced unidirectional composites // *International Journal of Fracture*. 1999. Vol. 100. P. 275–306. DOI: 10.1023/A:1018779307931.
12. ГОСТ 25.603–82. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). М.: Изд-во стандартов, 1983. 15 с.
13. Федонюк Н.Н., Маслич Е.А. Применение полимерных композиционных материалов в зарубежном судостроении. СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2024. 304 с.
14. Сукнев С.В. Нелокальные критерии разрушения. Критерии напряжения в точке // *Наука и образование*. 2008. № 1 (49). С. 27–32.
15. Минибаев М.И., Раскутин А.Е., Гончаров В.А. Особенности технологии изготовления образцов из ПКМ на станках с ЧПУ (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 1 (73). С. 105–114. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-105-114.
16. Хрульков И.А., Гуляев И.Н., Мишкин С.И. Особенности резки полимерных композиционных материалов алмазными кругами (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 4 (110). С. 22–31. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-22-31.
17. Минибаев М.И., Усачева М.Н., Дышенко В.С., Гончаров В.А. Приспособление и инструмент для изготовления образцов из полимерных композиционных материалов на станке с ЧПУ (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 4 (98). С. 100–109. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-100-109.
18. Канатов А.В., Зайцев Д.А., Запорожан Д.Ю. Особенности раскрытия специальных композитных материалов механическим точечным инструментом // *Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности: в 2 т.* М.: Изд-во Рос. гос. ун-та им. А.Н. Косыгина, 2021. Т. 1. С. 289–292.
19. Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Сидорина А.И., Соловьева Н.А. Усталость конструкционных органических полимеров // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 1 (74). С. 89–100. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-89-100.
20. ГОСТ Р 57864–2017. Метод определения предела прочности и модуля упругости при растяжении в направлении толщины образца. М.: Стандартинформ, 2017. 17 с.

#### References

1. Erasov V.S., Oreshko E.I. *Mechanical Testing and Properties of Structural Metallic Aviation Materials*: Textbook. Ed. E.N. Kablov. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 344 p.
2. Goldenblat I.I., Kopnov V.A. Strength Criterion of Anisotropic Materials. *Mekhanika*, 1965, no. 6, pp. 77–83.
3. Levin V.E., Laperdina N.A., Olegin I.P. Numerical Approach to Determining the Elastic Properties of Unidirectionally Reinforced Composites. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzhya*, 2019, no. 11, pp. 141–145.
4. Gunyaeva A.G., Kurnosov A.O., Slavin A.V. Experience in the use of polymer composite materials developed by NRC «Kurchatov Institute» – VIAM in engines for civil aircraft. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), pp. 82–94. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-82-94.
5. Shershak P.V., Yakovlev N.O., Sutubalov A.I. Standards for testing polymer composite materials. Part 1. Tensile properties. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), pp. 152–166. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-152-166.
6. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 122–144. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 09, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
7. Sutubalov A.I., Podzhivotov N.Yu., Shershak P.V., Yakovlev N.O. Evaluation of homogeneity of physical and mechanical properties of semi-finished products for aviation purpose. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), pp. 121–135. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 25, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-121-135.

8. Hancox N.L. The compression strength of unidirectional carbon fibre reinforced plastic. *Journal of materials science*, 1975, vol. 10, pp. 234–242. DOI: 10.1007/BF00540347.
9. Berkov N.A., Arkhangel'sky A.I., Arkhangel'skaya M.V. Nonlinear analysis of composite shell connections. *New technologies of higher education. Science, technology, pedagogy*. Moscow: Moscow Polytechnic, 2021, pp. 113–119.
10. Pyataev S.F. Effect of temperature on the strength of linearly reinforced boron-plastics under complex loading. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Ser.: Matematika i fizika*, 2012, vol. 5 (2), pp. 246–255.
11. Lee S., Waas A.M. Compressive response and failure of fiber reinforced unidirectional composites. *International Journal of Fracture*, 1999, vol. 100, pp. 275–306. DOI: 10.1023/A:1018779307931.
12. State Standard 25.603–82. *Methods of mechanical testing of composite materials with a polymer matrix (composites)*. Moscow: Publ. House of Standards, 1983, 15 p.
13. Fedonyuk N.N., Maslich E.A. *Application of polymer composite materials in foreign shipbuilding*. St. Petersburg: Krylov State Research Center, 2024, 304 p.
14. Suknev S.V. Non-local failure criteria. Point stress criteria. *Nauka i obrazovanie*, 2008, no. 1 (49), p. 27–32.
15. Minibaev M.I., Raskutin A.E., Goncharov V.A. Peculiarities of technology production specimens of PCM on CNC machines (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 1 (73), pp. 105–114. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 30, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-105-114.
16. Khruikov I.A., Gulyaev I.N., Mishkin S.I. Features of cutting polymer composite materials with diamond wheels (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 4 (110), pp. 22–31. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 18, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-22-31.
17. Minibaev M.I., Usacheva M.N., Dyshenko V.S., Goncharov V.A. A device and tool for making sample from polymer composite materials on a CNC machine (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 4 (98), pp. 100–109. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 22, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-100-109.
18. Kanatov A.V., Zaitsev D.A., Zaporozhan D.Yu. Features of cutting special composite materials with a mechanical point tool. *Improving energy and resource efficiency and environmental safety of processes and equipment in the chemical and related industries: in 2 vols*. Moscow: Publ. House of the Kosygin Rus. State Univ., 2021, vol. 1, pp. 289–292.
19. Zhelezina G.F., Kulagina G.S., Sidorina A.I., Soloveva N.A. Fatigue of constructional organoplastics. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 1, pp. 89–100. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-89-100.
20. State Standard 57864–2017. *Method for determining the ultimate strength and elastic modulus under tension in the direction of specimen thickness*. Moscow: Standartinform, 2017, 17 p.

**Информация об авторах**

**Васильчук Екатерина Александровна**, инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Губин Антон Михайлович**, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Гуляев Иван Николаевич**, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Клименко Оксана Николаевна**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Ekaterina A. Vasilchuk**, Engineer-Technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Anton M. Gubin**, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Ivan N. Gulyaev**, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Oksana N. Klimenko**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 18.06.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 01.07.2025.  
The article was submitted 18.06.2025; approved and accepted for publication after reviewing 01.07.2025.