

---

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-87-104

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТКАНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ОБЪЕМНО-АРМИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ (обзор)

Д.В. Гриневич<sup>1</sup>, К.И. Донецкий<sup>1</sup>, П.В. Шершак<sup>1</sup>, Н.О. Яковлев<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.** Рассмотрены тканые композиционные материалы с объемно-армированной структурой. Проведен обзор исследований по определению их механических свойств. Рассмотрены статьи, посвященные изучению микроструктуры материалов, их свойств при растяжении, сжатию, межслоевому разрушению, удару, циклическом нагружении. Проводится сравнение 3D-тканых композиционных материалов с ткаными слоистыми композиционными материалами, рассмотрено влияние структуры на механические свойства, приводятся основные параметры данных материалов, а также информация по характеру их разрушения. Отдельно рассмотрен вариант 3D-тканых композиционных материалов, выполненных по технологии изготовления без искажения слоев.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, ткань, растяжение, сжатие, удар, усталость, объемно-армированные текстильные преформы, 3D-ткачество

**Для цитирования:** Гриневич Д.В., Донецкий К.И., Шершак П.В., Яковлев Н.О. Механические свойства тканых композиционных материалов с объемно-армированной структурой (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 6 (124). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-87-104.

Scientific article

## MECHANICAL PROPERTIES OF WOVEN COMPOSITE MATERIALS WITH A 3D-REINFORCED STRUCTURE (review)

D.V. Grinevich<sup>1</sup>, K.I. Donetsky<sup>1</sup>, P.V. Shershak<sup>1</sup>, N.O. Yakovlev<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.** Considers woven composite materials with a 3D-reinforced structure. A review of studies on the determination of their mechanical properties is carried out. Articles devoted to the study of the microstructure of materials, their properties in tension, compression, interlayer fracture, impact, and cyclic loading are considered. A comparison of 3D-woven composite materials with woven 2D composite materials is carried out, the influence of the structure on mechanical properties is considered, the main parameters of these materials are given, as well as information on the nature of their destruction. A variant of the non-crimp 3D-woven composite materials is considered separately.

**Keywords:** polymer composite materials, woven, tension, compression, impact, fatigue, bulk-reinforced textile preforms, 3D-weaving

**For citation:** Grinevich D.V., Donetsky K.I., Shershak P.V., Yakovlev N.O. Mechanical properties of woven composite materials with a 3D-reinforced structure (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 6 (124), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-87-104.

**Введение**

В настоящее время в авиационной промышленности широкое применение нашли полимерные композиционные материалы (ПКМ) благодаря их высокой удельной прочности, жесткости, коррозионной стойкости и усталостной долговечности [1–4]. Однако однонаправленные слоистые ПКМ обладают существенным недостатком – неравномерным распределением механических свойств, при котором высокие характеристики обеспечиваются только в направлении укладки волокон. Для многослойной конструкции данный недостаток компенсируют разнонаправленностью слоев. Общим недостатком всех слоистых ПКМ также являются низкие межслойная прочность и стойкость к ударным воздействиям, плохое сопротивление сдвиговым деформациям и др. Применение ПКМ для создания сложных ответственных конструкций – например, лопастей ветряных турбин, стрингеров, ребер жесткости и др. – требует решения данной проблемы. Одно из решений – использование объемно-армированных тканых композиционных материалов, что позволяет обеспечить лучшее распределение характеристик благодаря наличию разнонаправленных волокон в объеме материала (рис. 1) [5–11].

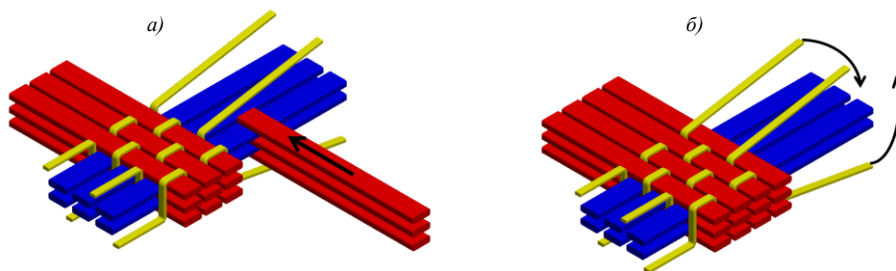


Рис. 1. Процесс производства 3D-тканого композиционного материала: *а* – движение нитей утка; *б* – прошивка сквозными *z*-нитями [12]

При изготовлении трехмерно-армированных тканых композиционных материалов применяют волокна в трех взаимно перпендикулярных направлениях: *x*, *y* – направления в плоскости листа ПКМ и *z* – высотное направление. Можно выделить ПКМ со следующими структурами *z*-армирования: ортогональной (рис. 2), под углом (рис. 3) и послойной (рис. 4) [12].

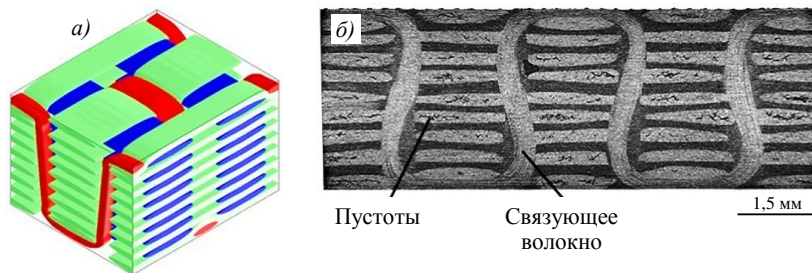


Рис. 2. Трехмерный тканый композиционный материал с ортогональным *z*-армированием: *а* – схематичное изображение [13]; *б* – вид поперечного сечения [14]

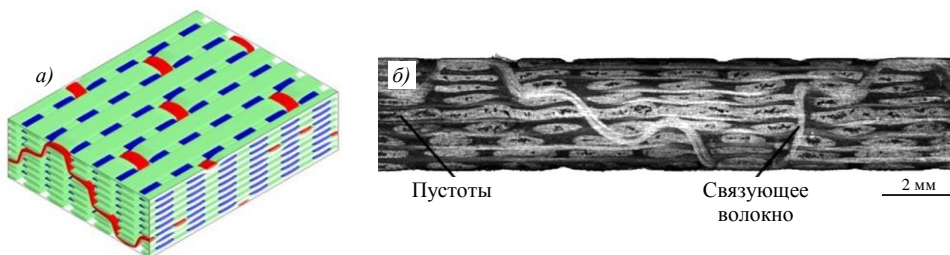


Рис. 3. Трехмерный тканый композиционный материал с *z*-армированием под углом: *а* – схематичное изображение [13]; *б* – вид поперечного сечения [14]

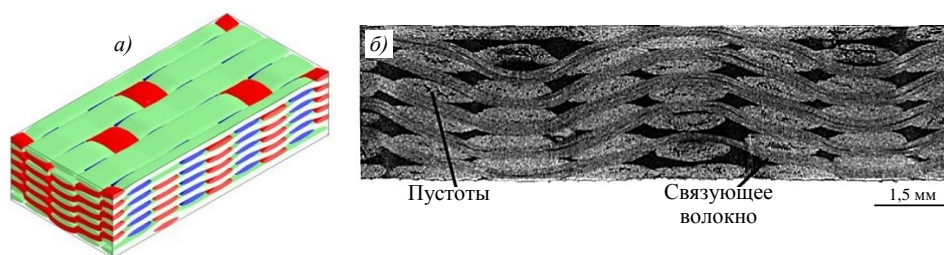


Рис. 4. Трехмерный тканый композиционный материал с послойным  $z$ -армированием:  $a$  – схематичное изображение [13];  $b$  – вид поперечного сечения [14]

При ортогональном армировании волокна  $z$ -направления протягиваются через нити основы и утка, пересекая слои под углом  $90$  градусов. Если нити чередуются равномерно в каждом из трех направлений, то обеспечиваются квазиизотропные свойства. В случае, когда требуется анизотропия – можно варьировать число нитей по направлениям. Армирование может выполняться по всей толщине многослойной преформы, в которой связующая нить удерживает все слои вместе, или же обеспечивать послойную связь, для чего связующая нить перемещается из слоя в соседний слой и возвращается обратно.  $Z$ -армирование под углом подразумевает, что связующие нити проходят через всю толщину (или несколько слоев) под некоторым углом к вертикали. Связующая нить может иметь одно и то же количество волокон, как и нити основы и утка, или быть более тонкой, если этого достаточно для связи слоев. В одинаковых условиях объемно-армированные тканые структуры со схемой переплетения под углом обладают лучшей драпируемостью и способностью к деформации, тогда как ортогональное ткачество обеспечивает большую объемную долю волокна (особенно в направлении толщины) и большую прочность.

Свойства тканых композиционных материалов с объемно-армированной структурой будут существенно отличаться от свойств материалов с традиционной структурой. Их изучение важно для дальнейшего расширения области применения ПКМ, армированных непрерывными волокнами. В данной статье приводится обзор исследований тканых ПКМ с объемно-армированной структурой [15].

Процесс производства ткани приводит к возникновению различного рода дефектов в микроструктуре. Повреждения возникают из-за перегиба нитей и при скольжении их в ткацком оборудовании. Основными типами дефектов являются истирание, обрыв и деформация нитей, а также могут возникать области с высоким или низким содержанием смолы [16, 17]. Данные дефекты ухудшают механические свойства ПКМ. Истирание и обрыв волокон являются самыми распространенными видами повреждений и могут привести к значительному снижению прочности при растяжении – как для 2D, так и для 3D армированных ПКМ.

В работе [16] приводятся результаты оценки прочности на разрыв жгутов стекловолокна после различных вариантов обработки (сматывание, натягивание, переплетение) – общее снижение прочности составило  $\sim 30\%$ . В каждом конкретном случае на это влияет множество факторов: диаметр нити, структура армирования, тип ткацкого станка. Сильное влияние оказывает хрупкость волокна. Так, ткань из стекловолокна будет иметь большую потерю прочности, чем из углеродного или арамидного.

В отличие от полимерных композиционных 2D-материалов в тканых 3D-материалах наблюдается сильное искривление волокон утка и основы из-за стягивания их сквозными нитями. В работах [18–20] приводятся значения угла смещения оси волокон из плоскости слоя до  $4$ – $12$  градусов, в то время как в 2D-материалах отклонение не превышает  $2$ – $3$  градуса. Получаемые полости могут не заполниться связующим, что

приведет к образованию пористости в пластике. Сквозные нити испытывают при растяжении материала сильную деформацию и могут смещаться. В работах [19, 21] для ткани с ортогональной схемой армирования получили угол смещения до 45 градусов. При этом сквозная нить имеет вид, близкий к синусоиде.

В работе [14] проведено сравнение свойств полимерного композиционного 3D-материала из углеродного наполнителя с различными схемами объемного армирования. Показано, что сквозные волокна увеличивают долю пустот, поскольку часть связующего, заполняющего пространство между волокнами основы и утка, «блокируется» сквозными жгутами. В этом случае ортогональная структура  $z$ -армирования создает наибольшее количество пор по сравнению с другими структурами.

Независимо от типа структуры, жесткость и прочность на растяжение тканых полимерных композиционных 3D-материалов при осевой нагрузке в основном зависят от объемной доли волокон в соответствующем направлении. Среди всех структур ортогональные тканые полимерные композиционные 3D-материалы показывают наилучшие характеристики (самая высокая прочность на разрыв и деформация при разрушении) при внеосевой нагрузке. Это происходит благодаря сцеплению высотных волокон – сквозных, трансверсальных,  $z$ -волокон – с волокнами основы и утка и возможности их поворота вокруг вертикальных жгутов как вокруг оси, что позволяет лучше воспринимать внеосевую нагрузку. Кроме того, из-за высокой плотности высотных волокон у данного типа структуры, напряжения вдоль волокон лучше распределяются, предотвращаются проскальзывания между нитями в плоскости и повреждения распределяются равномерно по всей рабочей длине образца. Ортогональные тканые полимерные композиционные 3D-материалы демонстрируют самое высокое поглощение энергии при внеосевой нагрузке, что позволяет использовать их в конструкциях, где одним из основных необходимых свойств является поглощение энергии и ударостойкость.

В работе [22] показано, что для полимерных композиционных 3D-материалов со сквозной нитью, идущей под углом, при растяжении в направлениях основы или утка, влияние объемной доли высотных волокон незначительно.

### **Свойства на растяжение**

В случае сравнения полимерных композиционных 3D- с 2D-материалами следует учитывать, что сравнение «эквивалентных» материалов подразумевает одинаковую общую объемную долю волокон в материале. Следовательно, для 3D-материалов количество волокон в плоскости  $x$ – $y$  будет меньше. Модуль упругости тканых 3D-композиатов в основном ниже, чем модуль для эквивалентного им 2D-композиата. Данные, полученные в работе [16], показывают, что модуль упругости для 3D-композиата ниже на ~35 %. В других исследованиях получено снижение от 10 до 35 % [23, 24].

В работах [22–24] модуль упругости  $u$  полимерных композиционных 3D-материалов получился эквивалентным или даже несколько большим, чем у 2D-композиатов. При использовании данных результатов следует учитывать – насколько точно соблюдалось равенство объемных долей волокон при сравнении.

Низкий модуль упругости тканых 3D-композиатов также связан с искажением формы жгутов в плоскости  $x$ – $y$ , вызванным сквозными волокнами.

Уникальной особенностью многих тканых 3D-композиатов является то, что они начинают «разупрочняться» при относительно низких уровнях растягивающих напряжений [16, 19, 23, 24]. На деформационной кривой это выражается в перегибе. Жесткость при этом может снизиться на 20–50 % в зависимости от типа материала. Связано это с началом «пластической» деформации наиболее искаженных от сквозного армирования волокон. Внутри жгута начинается сдвиг волокон [18, 19], при этом в материале происходит растрескивание матрицы, разрыв жгутов и другие типы повреждений [17–19].

Разрушение при растяжении обычно происходит в результате разрыва волокон в плоскости слоя. Данные волокна могут значительно повреждаться в процессе производства. В итоге прочность на растяжение тканого 3D-композита часто ниже, чем у эквивалентного 2D-материала [25–30].

### Свойства на сжатие

В настоящее время опубликовано не так много работ, в которых приводятся результаты испытаний на сжатие тканых 3D-композитов. В большинстве исследований получено, что модуль упругости при сжатии тканых 3D-композитов ниже, чем у эквивалентных однонаправленных или тканых 2D-материалов [24, 27, 30]. Более низкий модуль упругости обусловлен обжимом и искажением формы жгутов от высотных волокон (появлению волн). При этом возможно как повышение, так и снижение прочности материала [31, 32]. Однако следует отметить, что прочность на сжатие тканых 3D-композитов отличается не более чем на  $\pm 20\%$  от прочности тканых 2D-композитов, что соотносится с результатами на растяжение и вызвано, по-видимому, теми же эффектами.

### Межслоевые свойства

Важным преимуществом тканых 3D-композитов, по сравнению с обычными ткаными 2D-композитами, является высокая устойчивость к расслаиванию и растрескиванию [33–35], что способствует их использованию в высоконагруженных или подверженных ударам конструкциях авиационной техники, таких как соединения панелей крыла [36], фланцы, роторы турбин [37] и др.

В работах [25, 37–39] показано, что вязкость межслойного разрушения по *моду* I тканых 3D-композитов выше, чем у тканых 2D-композитов. Значение данной характеристики растет с увеличением объемного содержания, модуля упругости, прочности на растяжение и сопротивления выдергиванию  $z$ -волокон в материале. Однако даже относительно небольшая доля таких волокон может обеспечить значительное повышение значений сопротивления расслаиванию. Например, в работе [39] обнаружено, что межслоевая вязкость разрушения при отрыве для тканого 3D-композита из углеродного волокна с содержанием 1 %  $z$ -волокон была в  $\sim 14$  раз выше, чем у тканых 2D-композитов. Данные об одном из наибольших увеличений межслоевой вязкости разрушения тканого 3D-композита приводятся в работе [25], где доля содержания  $z$ -волокон в 8 % дала ее повышение более чем в 20 раз. Таким образом, оптимальным для повышения межслоевой прочности будет ортогональное  $z$ -армирование. В работе [40] показано, что даже небольшое отклонение от вертикали  $z$ -волокон приводит к снижению межслоевой вязкости разрушения. Последнее происходит из-за того, что вместо простого растяжения  $z$ -волокна начинают работать и на сдвиг [41].

Трехмерные тканые ПКМ также имеют преимущество при расслоении по *моду* II [42]. Армирование углеродными волокнами по толщине увеличило вязкость межслойного разрушения тканых 3D-композитов по *моду* II до 150 % по сравнению с 2D-композитом. Ортогональная структура таких ПКМ наиболее эффективна против разрушения по *моду* I. В случае нагружения образцов по *моду* II получено, что ортогональная и послойная структура  $z$ -армирования дают одинаковые результаты. Образцы с  $z$ -армированием под углом демонстрируют худшие результаты и для испытаний на разрушение по *модам* I и II [42].

В статье [43] получено, что чем больше содержание  $z$ -волокон, тем больше межслоевая вязкость разрушения – доля таких волокон в 1,1 % позволила увеличить межслоевую вязкость разрушения почти на 400 %.

В некоторых материалах  $z$ -волокна могут проскальзывать, но при этом они остаются неповрежденными и удерживают образец от полного разрушения (зона таких

неразрушенных  $z$ -волокон может простираться до 30 мм от вершины трещины). Эти волокна препятствуют расслаиванию, способны выдерживать большую часть приложенной нагрузки и тем самым снижают напряжения в вершине трещины [44].

Свойства при межслоевом сдвиге тканого 3D-композита, как правило, равны или немного выше, чем у эквивалентного тканого 2D-материала. Последнее демонстрируется в работах [23, 24, 27, 45].

В работе [46] исследования показали снижение кажущейся межслойной прочности на сдвиг для тканого 3D-композита по сравнению с ткаными 2D-композитами, которые демонстрируют большую нагрузку первоначального пика, однако после него жесткость образца резко снижается, а растрескивание приводит к разрушению образца. Хотя у тканых 3D-композитов пик и ниже (что связано с ослаблением материала за счет  $z$ -армирования), но после него наблюдается ступенчатый процесс постепенного разрушения – образец выдерживает большие деформации, а растрескивание образца сдерживается сквозным армированием (в работе [46] приведены результаты для ПКМ из стекловолокна с объемными долями содержания  $z$ -армирования 3 и 10 %).

В работе [47] на примере джутовых тканых 3D-композитов по результатам испытаний методом короткой балки показано, что ортогональное  $z$ -армирование обеспечивает образцу наибольшую неупругую деформацию.

В работах [48, 49] на образцах в форме короткой балки исследовано влияние угла поворота ткани в плоскости на механические свойства. Образцы с расположением основы по оси 0 и 90 градусов показали более высокие значения прочности. Однако поглощение энергии происходит лучше в образцах, вырезанных так, что в них оси основы или утка не совпадают с продольной осью образца. Такие образцы могут испытывать большие деформации.

В работе [50] по результатам испытаний методом короткой балки демонстрируется повышение межслоевой прочности модифицированного тканого 3D-композита с углеродным волокном, а в статье [51] проведен анализ научно-технической литературы последних лет по тканым 3D-композитам и делается вывод о недостаточном внимании, уделенном в исследованиях испытаниям на сдвиг в плоскости листа, изгиб и межслоевой сдвиг.

### Сопротивление удару

Как отмечалось ранее, основное преимущество тканых 3D-композитов – это поглощение энергии, что делает их перспективными материалами для использования в конструкции фюзеляжа, который может в течение всего срока эксплуатации летательного аппарата подвергаться повреждениям посторонними предметами (Foreign Object Damage). К ним относятся: повреждения от ударов камней, поднятых с поверхности взлетно-посадочных полос при разбеге и посадке; столкновения с птицами во время полета и с наземной техникой; падение инструмента; погодные воздействия, такие как град. Испытанию тканых 3D-композитов с помощью ударов с низкой и средней энергией посвящены работы [25, 26, 45, 52–55]. Трехмерные тканые композиты испытывали на удар при низком и среднем уровнях энергии с использованием легких низкоскоростных снарядов для оценки их устойчивости к повреждениям конструкций самолетов от града и столкновения с птицами во время полета, а также возможному падению инструмента во время технического обслуживания.

В работах [56, 57] проводилось испытание на удар с высокой энергией. Обнаружено, что площадь поврежденной поверхности у тканых 3D-композитов меньше, чем у тканых 2D-композитов с тем же объемным содержанием волокон [52]. Однако в работе [58] в целом получены противоречивые результаты: прочность после удара оказалась практически одинаковой для трех типов двумерных ПКМ, слоистых с последующей прошивкой

углеродным волокном и тканых 3D-композитов. После испытания у тканых 3D-композитов обнаружено внутреннее растрескивание, и чем больше была доля  $z$ -армирования в образце, тем дальше от места удара распространялось растрескивание [59].

Хорошая стойкость к ударным повреждениям тканых 3D-композитов обычно приводит к более высоким механическим свойствам после удара, чем у тканых 2D-композитов [25, 26, 55, 56, 60]. Например, в работах [25, 60] показано, что прочность на сжатие после удара больше у тканых 3D-композитов, чем у 2D-материала. Так, до удара у 2D-материала прочность была больше на 22 %, а после удара с энергией 3,3 Дж/мм – уже прочность тканого 3D-композита больше на 9 %. Для удара с энергией 6,7 Дж/мм – прочность тканого 3D-материала больше на 26 %. Прочность образцов при изгибе, проведенном после удара, также значительно больше у тканых 3D-материалов. Так, при ударах с энергией 2–5 Дж прочность тканых 2D-материалов снижается на 40–60 % от значений прочности для неповрежденного композита. Последующее увеличение энергии удара приводит к снижению прочности на 70–80 % от первоначальной. В то же время у тканых 3D-композитов снижение прочности на изгиб при ударе с энергией 3–8 Дж составляет приблизительно 10–20 % от первоначального значения, при 18 Дж: 30 %, а при 23 Дж: 35 %.

В работе [61] для тканых 3D-композитов исследованы свойства после удара на сжатие и четырехточечный изгиб. Результаты показали, что чем больше энергия удара, тем сильнее проявляется расслоение в тканых 2D-композитах, а прочность снижается на 20 % (для энергии удара в 100 Дж), и тем более выигрышно выглядит тканый 3D-материал, у которого прочность на сжатие осталась на том же уровне. Для удара с энергией 25 Дж при четырехточечном изгибе прочность тканого 2D-композита снизилась в 4 раза, а для тканого 3D-композита – в 1,7 раза.

#### Усталостная долговечность

Трехмерные тканые ПКМ в основном обладают меньшей усталостной долговечностью по сравнению с ткаными 2D-композитами. Механика разрушения таких материалов связана с появлением трещин возле  $z$ -жгутов, которые создают искажения формы других жгутов, что приводит к дефектам матрицы и образованию концентраторов напряжений. Например, это подробно продемонстрировано в работе [43]. Анализ микроструктуры показал, что места, где проходят сквозные  $z$ -нити служат очагом зарождения трещин, это вызывает раннее отслоение волокон от матрицы и последующие разрывы волокон.

В работе [62] приводятся результаты исследования тканых 3D-композитов на трехточечный изгиб – статический и циклический ( $R = 0,1$ ). Исследованы материалы из стекловолокна с ортогональными  $z$ -волоконными и с волокнами, расположенными под углом. Хотя тканый 3D-композит с ортогональными  $z$ -волоконными имел более высокую статическую прочность, но при циклическом воздействии усталостная долговечность больше у аналогичного композита с  $z$ -волоконными, расположенными под углом.

В статье [63] приводятся результаты по исследованию тканых 3D-композитов из стекловолокна для двух вариантов  $z$ -армирования: под углом и послойно. Для образцов с послойным  $z$ -армированием получены лучшие статические свойства – прочность при растяжении больше на 9 %, но усталостная долговечность была больше у образцов с  $z$ -армированием под углом – приблизительно на 5–9 % на различных уровнях нагружения. Оба материала показали значительную устойчивость к разрушению даже с большим количеством трещин и расслоений.

Элементы конструкции летательных аппаратов часто могут работать в условиях повышенной температуры – особенно детали, связанные с двигателем (воздуховоды и лопатки двигателя, выхлопные створки), а также нагреваемые кромки крыльев и т. п.

Для изготовления этих элементов требуются материалы, обладающие коррозионной стойкостью в сочетании с отличными термостойкостью и устойчивостью к повреждениям, а также повышенной усталостной долговечностью. В работе [64] проведено сравнение тканых 2D- и 3D-композитов из углеродного волокна при повышенной температуре (329 °C). Для тканых 3D-композитов критическое значение уровня нагрузки для  $2 \cdot 10^5$  циклов составило 303 МПа (40 % от предела прочности), для 2D-материала: 243 МПа (30 % от предела прочности). Оба материала лучше работали при цикле «растяжение–растяжение». При циклических испытаниях с включением в цикл нагружения сжатия усталостная долговечность значительно снижалась у обоих ПКМ, но у 2D-материала это проходило существеннее. Все образцы разрушались в момент сжатия. Двумерно-армированный ПКМ разрушался из-за расслоения и растрескивания матрицы. Трехмерные тканые ПКМ за счет  $z$ -армирования не расслаивались, разрушение происходило при сдвиге между слоями при разрыве  $z$ -волокон. Наличие высотных волокон в тканом 3D-материале повышает его устойчивость к расслаиванию и, следовательно, ограничивает рост повреждений во время сжатия. Трехмерный ПКМ разрушается из-за разрыва волокон высотных жгутов при сдвиге.

В статье [65] приводятся общие выводы по усталости тканых 3D-композитов:

- на усталостные свойства тканых 3D-композитов влияют механические характеристики как волокон в плоскости, так и волокон  $z$ -армирования;
- схема  $z$ -армирования влияет на характер зарождения и рост трещин при циклической нагрузке;
- разные уровни напряжения приводят к разной степени поврежденности тканых 3D-композитов;
- при одном и том же уровне напряжения остаточная прочность и жесткость уменьшаются с увеличением числа циклов нагрузки;
- направление нагрузки оказывает большое влияние на усталостные свойства;
- усталостные свойства тканых 3D-композитов зависят от температуры.

В исследовании [66] также приводятся обобщенные сведения о характере усталостного разрушения:

- в основном разрушаются волокна нитей основы;
- места изгибов волокон  $z$ -армирования являются зонами зарождения начальных трещин в матрице;
- трение между нитями основы и  $z$ -армирования (за счет эффекта Пуассона) при приложении растягивающего напряжения может снизить усталостную долговечность образца.

Данные обобщения сделаны на основе множества работ по исследованию усталостной долговечности тканых 3D-композитов. Тем не менее указывается, что, несмотря на множество проведенных работ, необходимо и дальше развивать данную область исследования.

### **Тканые 3D-композиты без искажения слоев**

Для решения проблемы с волнообразным деформированием жгутов в тканых 3D-материалах разработана технология изготовления так называемых тканых 3D-композитов без искажения слоев (Non-Crimp Fabric – NCF). Данная технология подразумевает комбинацию создания однонаправленных и тканых ПКМ. Сначала происходит выкладка слоев в последовательности, обеспечивающей квазиизотропную укладку, а затем прошивка сквозной  $z$ -нитью (рис. 5, а). После этого проводятся пропитка связующим и отверждение.

Данная технология снижает повреждаемость  $z$ -нитей стекло- и углеволокна в процессе изготовления, а также повышает механические свойства материала за счет уменьшения геометрических искажений волокон. Сравнение различных схем армирования приведено на рис. 5, б, для тканых 3D-композитов даны изображения со стороны утка и основы.

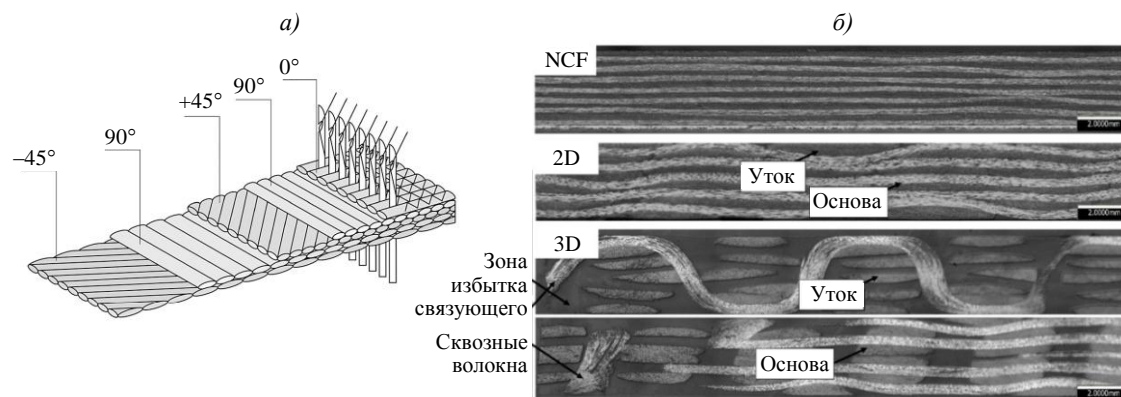


Рис. 5. Трехмерные тканые композиционные материалы без искажения слоев: а – схема изготовления [67]; б – вид поперечного сечения, полученного с использованием компьютерной томографии [68]

В работе [69] представлено исследование тканых 3D-композитов из стекловолокна без искажения слоев. Такие композиты обладают несколько большей прочностью на сдвиг в плоскости листа в сравнении с обычными ткаными 3D-композитами за счет наличия слоев с армированием в направлениях  $\pm 45$  градусов. За счет сквозного армирования они также показали более высокие значения модуля упругости и прочности на сдвиг по сравнению с 2D-материалами – в 3,3 и 2,5 раза соответственно.

В статье [70] на материалах из стекловолокна получены следующие результаты: усталостная долговечность тканых 3D-композитов без искажения слоев больше, чем у тканых 2D-композитов. В зависимости от уровня нагрузки разница составляет от 30 до 80 %. У обычных тканых 3D-композитов разница еще больше и составляет от 23 до 95 % – чем ниже уровень нагрузки, тем больше разница.

В работе [71] представлен сравнительный анализ свойств ПКМ из углеродного волокна после удара с малой энергией (одиночный и три последовательных удара в разные места образца). По площади поврежденной поверхности традиционные тканые 3D-композиты показали лучший наименьший результат, у тканых 2D-материалов площадь поврежденной поверхности больше в 1,6 раза, а у тканых 3D-композитов, выполненных по технологии без искажения слоев, она больше в 2,8 раза. При испытании на сжатие после удара тканые 2D- и 3D-композиты без искажения слоев демонстрируют более быстрое разрушение. Образцы из обычных тканых 3D-композитов продемонстрировали лучшую стойкость к удару: прочность при сжатии после удара у них остается на уровне 90–95 % от исходной. В то же время у тканых 3D-композитов без искажения слоев она снижается до 80 % при одиночном ударе и до 60 % – при трехкратном, а у тканых 2D-композитов – до 75 и 60 % соответственно.

### Заключения

В представленном обзоре собраны основные результаты исследования свойств тканых 3D-композитов. Данные материалы за счет своей структуры обладают хорошей межслойной прочностью и остаточной прочностью после удара. Большим их недостатком является искривление жгутов и слоев, что значительно ухудшает механические

свойства при статических и циклических нагрузках по сравнению с 2D-материалами. За счет сложной внутренней структуры характер разрушения у тканых 3D-композитов более сложный, чем у тканых 2D-композитов.

Многие рассмотренные работы указывают на необходимость более подробного исследования структуры данных материалов, расширения применения компьютерной томографии и метода корреляции цифровых изображений для комплексного анализа их разрушения.

Следует отметить необходимость дальнейших исследований и совершенствования данных материалов, включая поиск компромиссных решений по объемной доле армирующих  $z$ -волокон, а также развитие технологий изготовления (примером служит технология изготовления тканых 3D-композитов без искажения слоев), что позволит расширить области их применения.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

### Список источников

1. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докладов XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
2. Каблов Е.Н., Сагомонова В.А., Сорокин А.Е., Целикин В.В., Гуляев А.И. Исследование структуры и свойств полимерного композиционного материала с интегрированным вибропоглощающим слоем // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. № 3. С. 2–9.
3. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
4. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
5. Сорокин А.Е., Иванов М.С., Сагомонова В.А. Термопластичные полимерные композиционные материалы на основе полиэфирэфиркетонов различных производителей // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.07.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-41-50.
6. Гриневич Д.В., Яковлев Н.О., Славин А.В. Критерии разрушения полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 7 (79). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111.
7. Белинис П.Г., Донецкий К.И., Лукьяненко Ю.В., Рогожников В.Н., Майер Ю., Быстрикова Д.В. Объемно-армирующие цельнотканые преформы для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.
8. Славин А.В., Силкин А.Н., Гриневич Д.В., Яковлев Н.О. Композиционные материалы с объемно-армированной структурой (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 8 (114). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-113-122.
9. Яковлев Н.О., Давыденко А.Н., Монахов А.Д. Критерии повреждаемости для прогнозирования остаточной усталостной долговечности ПКМ // Физико-механические испытания, прочность и надежность современных конструкционных и функциональных материалов: материалы XIV Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «Тест-Мат». М., 2022. С. 240–249.

10. Яковлев Н.О., Попкова Е.А., Ландик Д.Н. Деформация как критерий качества углеродного волокна // Роль фундаментальных исследований при реализации Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. М., 2021. С. 198–203.
11. Tong L. 3D Fibre Reinforced Polymer Composites. Elsevier Science, 2002. 254 p.
12. Pankow M.R. The Deformation Response of 3D Woven Composites Subjected to High Rates of Loading: PhD thesis. The University of Michigan, 2010. 208 p. URL: <https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/77889> (дата обращения: 25.08.2022).
13. Saleh M.N., Yudhanto A., Lubineau G., Soutis C. The effect of z-binding yarns on the electrical properties of 3D woven composites // Composite Structures. 2017. No. 182. P. 606–616. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.081.
14. Saleh M.N., Yudhanto A., Potluri P. et al. Characterising the loading direction sensitivity of 3D woven composites: Effect of z-binder architecture // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2016. No. 90. P. 577–588. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.08.028.
15. Сидорина А.И., Сафронов А.М., Куцевич К.Е., Клименко О.Н. Углеродные ткани для изделий авиационной техники // Труды ВИАМ. 2020. № 12 (94). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58.
16. Lee L., Rudov-Clark S., Mouritz A. et al. Effect of weaving damage on the tensile properties of three-dimensional woven composites // Composite Structures. 2002. No. 57. P. 405–413. DOI: 10.1016/s0263-8223(02)00108-3.
17. Lee B., Leong K.H., Herszberg I. Effect of Weaving on the Tensile Properties of Carbon Fibre Tows and Woven Composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2001. No. 20 (8). P. 652–670. DOI: 10.1177/073168401772679011.
18. Cox B.N., Carter W.C., Fleck N.A. A Binary Model of Textile Composites – I. Formulation // Acta Metallurgica et Materialia. 1994. No. 42. P. 3463–3479.
19. Callus P.J., Mouritz A.P., Bannister M.K., Leong K.H. Tensile properties and failure mechanisms of 3D woven GRP composites // Composites. 1999. No. 30A. P. 1277–1287.
20. Kuo W.-S., Ko T.-H. Compressive damage in 3-axis orthogonal fabric composites // Composites. 2000. No. 31A. P. 1091–1105.
21. Leong K.H., Lee B., Herszberg I., Bannister M.K. The effect of binder path on the tensile properties and failure of multilayer woven CFRP composites // Composites Science and Technology. 2000. No. 60. P. 149–156.
22. Gerlach R., Siviour C.R., Wiegand J., Petrinic N. In-plane and through-thickness properties, failure modes, damage and delamination in 3D woven carbon fibre composites subjected to impact loading // Composites Science and Technology. 2012. No. 72. P. 397–411. DOI: 10.1016/j.compscitech.2011.11.032.
23. Ding Y.Q., Yan Y., McIlhagger R., Brown D. Comparison of the fatigue behavior of 2D- and 3D-woven fabric reinforced composites // Journal of Materials Processing Technology. 1995. No. 55. P. 171–177. DOI: 10.1016/0924-0136(95)01950-2.
24. Guess T.R., Reedy E.D. Jr. Comparison of Interlocked Fabric and Laminated Fabric Kevlar 49/Epoxy Composites // Journal of Composites Technology & Research. 1985. No. 7. P. 136–142.
25. Arendts F.J., Drechler K., Brandt J. Advanced textile structural composites – status and outlook // Proc. of the Int. Conf. on Advanced Composite Materials. Wollongong, 1993. P. 409–416
26. Brandt J., Drechsler K., Arendts F.-J. Mechanical performance of composites based on various three-dimensional woven-fibre preforms // Composites Science and Technology. 1996. No. 56. P. 381–386. DOI: 10.1016/0266-3538(95)00135-2.
27. Lomov S.V., Bogdanovich A.E., Ivanov D.S. et al. A comparative study of tensile properties of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass composites. Part 1: Materials, methods and principal results // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2009. No. 40. P. 1134–1143. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.03.012.
28. Cox B.N., Flanagan G. Handbook of Analytical Methods for Textile Composites. Rockwell Science Center, 1996. 161 p.
29. Lee C., Liu D. Tensile strength of stitching joint in woven glass fabrics // Journal of Engineering Materials and Technology. 1990. No. 112. P. 125–130.

30. Farley G.L., Dickinson L.C. Removal of surface loop from stitched composites can improve compression and compression-after-impact strengths // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 1992. No. 11. P. 633.
31. Pankow M., Waas A.M., Yen C.-F. Modeling the response of 3D textile composites under compressive loads to predict compressive strength // *Computers, Materials and Continua*. 2012. No. 32. P. 81–106.
32. Siyuan Y., Xiuhua C. Tension-compression fatigue behavior of 3D woven composites // *IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. No. 388. P. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899x/388/1/012016.
33. Яковлев Н.О., Гуляев А.И., Лашов О.А. Трещиностойкость слоистых полимерных композиционных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2016. № 4 (40). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-12-12.
34. Гриневиц Д.В., Яковлев Н.О., Славин А.В., Лашов О.А. Особенности моделирования расслоения полимерных композиционных материалов при отрыве // *Деформация и разрушение материалов*. 2022. № 1. С. 2–10. DOI: 10.31044/1814-4632-2022-1-2-10.
35. Шершак П.В. Особенности национальной стандартизации методов испытаний полимерных композиционных материалов // *Труды ВИАМ*. 2019. № 2 (74). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-77-88.
36. Wong R. Sandwich construction in the Starship // *Proceedings of the 37th international SAMPE symposium and exhibition*, 9–12 March, 1992. P. 186–197.
37. Mouritz A.P., Bannister M.K., Falzon P.J., Leong K.H. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1999. Vol. 30. No. 12. P. 1445–1461. DOI: 10.1016/S1359-835X(99)00034-2.
38. Byun J.-H., Gillespie J.W., Chou T.-W. Mode I delamination of a three-dimensional fabric composite // *Delamination in Advanced Composites*. 1989. No. 1. P. 457–478.
39. Guenon V.A., Chou T.-W., Gillespie J.W. Toughness properties of a three-dimensional carbon-epoxy composite // *Journal of Materials Science*. 1989. No. 24. P. 4168–4175.
40. Stegshuster G., Pingkarawat K., Wendland B., Mouritz A.P. Experimental determination of the mode I delamination fracture and fatigue properties of thin 3D woven composites // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2016. No. 84. P. 308–315. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.02.008.
41. Fishpool D.T., Rezai A., Baker D. et al. Interlaminar toughness characterisation of 3D woven carbon fibre composites // *Plastics, Rubber and Composites*. 2013. No. 42. P. 108–114. DOI: 10.1179/1743289812Y.0000000036.
42. Ladani R.B., Nguyen A.T.T., Wang C.H., Mouritz A.P. Mode II interlaminar delamination resistance and healing performance of 3D composites with hybrid z-fibre reinforcement // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019. No. 120. P. 21–32. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.02.010.
43. Rudov-Clark S., Mouritz A.P. Tensile fatigue properties of a 3D orthogonal woven composite // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2008. No. 39. P. 1018–1024. DOI: 10.1016/j.compositesa.2008.03.001.
44. Pankow M., Waas A.M., Yen C.F., Ghiorse S. Resistance to delamination of 3D woven textile composites evaluated using End Notch Flexure (ENF) tests: Cohesive zone based computational results // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2011. Vol. 42. No. 12. P. 1863–1872.
45. Chou S., Wu C.-J. A study of the physical-properties of epoxy-resin composites reinforced with knitted glass-fiber fabrics // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 1992. No. 11. P. 1239–1250.
46. Walter T.R., Subhash G., Sankar B.V., Yen C.F. Monotonic and cyclic short beam shear response of 3D woven composites // *Composites Science and Technology*. 2010. No. 70. P. 2190–2197. DOI: 10.1016/j.compscitech.2010.08.022.
47. Kashif M., Hamdani S.T., Zubair M., Nawab Y. Effect of interlocking pattern on short beam strength of 3D woven composites // *Journal of Composite Materials*. 2019. Vol. 53. No. 20. P. 2789–2799. DOI: 10.1177/0021998319839441.
48. Zhang D., Liu X., Gu Y. et al. Effects of off-axis angle on shear progressive damage of 3D woven composites with X-ray micro-computed tomography // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019. Vol. 53. No. 20. P. 2789–2799. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.10.007.

49. Zhang D., Liu X., Gu Y. et al. Effects of off-axis angle on shear progressive damage of 3D woven composites with X-ray micro-computed tomography // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018. No. 115. P. 311–320. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.10.007.
50. Wu X.C., Shan Z.D., Liu F., Wang Y. The Effect of Guide Sleeves on Shear Behavior of 3D Weaving Composites // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. No. 597. P. 89–94. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.597.89.
51. Saleh M.N., Soutis C. Recent advancements in mechanical characterisation of 3D woven composites // *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*. 2017. No. 3. P. 1–17. DOI: 10.1186/s40759-017-0027-z.
52. Billaut F., Roussel O. Impact resistance of 3-D graphite/epoxy composites // *Proceedings of the 11 International Conference on Composite Materials*. Woodhead Publishing Ltd, 1995. Vol. 5. P. 551–558.
53. Herrick J.W., Globus R. Impact resistance multidimensional composites // *Proceedings of the 12 National SAMPE Technical Conference*. Seattle, 1980. P. 845–856.
54. Reedy E.D., Guess T.R. Additional comparisons of interlocked fabric and laminated fabric Kevlar 49/epoxy composites // *Journal of Composites Technology and Research*. 1986. No. 8. P. 163–168.
55. Susuki I., Takatoya T. Impact damage properties of 3-D carbon/hismaleimide composites // *Proceedings of the 5 Japan Int. SAMPE Symposium, Tokyo, 28–31 Oct. 1997*. P. 691–696.
56. James B., Howlett S. Enhancement of post impact structural integrity of GFRP composite by through-thickness reinforcement // *Proceedings of the 2nd European Fighting Vehicle Symposium*. Shrivenham, 1997. P. 543–571.
57. Ballistic resistant article comprising a three-dimensional interlocking woven fabric: pat. US 5,456,974; заявл. 28.02.94; опубл. 10.10.95.
58. Walter T.R., Subhash G., Sankar B.V., Yen C.F. Damage modes in 3D glass fiber epoxy woven composites under high rate of impact loading // *Composites. Part B: Engineering*. 2009. No. 40. P. 584–589. DOI: 10.1016/j.compositesb.2009.04.021.
59. Pankow M., Waas A.M., Yen C.-F. Modeling the response of 3D textile composites under compressive loads to predict compressive strength // *Computers, Materials and Continua*. 2012. No. 32. P. 81–106.
60. Voss S., Fahmy A., West H. Impact tolerance of laminated and 3 dimensionally reinforced graphite-epoxy panels // *Proceedings of the International Conference on Advanced Composite Materials*. Wollongong, 1993. P. 591–596.
61. Hart K.R., Chia P.X.L., Sheridan L.E., Wetzel E.D., Sottos N.R., White S.R. Comparison of Compression-After-Impact and Flexure-After-Impact protocols for 2D and 3D woven fiber-reinforced composites // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017. No. 101. P. 471–479. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.07.005.
62. Jin L., Niu Z., Jin B.C. et al. Comparisons of static bending and fatigue damage between 3D angle-interlock and 3D orthogonal woven composites // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2012. No. 31. P. 935–945. DOI: 10.1177/0731684412450626.
63. Yu B., Bradley R.S., Soutis C. et al. 2D and 3D imaging of fatigue failure mechanisms of 3D woven composites // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2015. Vol. 77. P. 37–49.
64. Ruggles-Wrenn M.B., Alnatifat S.A. Fully-reversed tension-compression fatigue of 2D and 3D woven polymer matrix composites at elevated temperature // *Polymer Testing*. 2021. No. 97. Art. 107179. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2021.107179.
65. Ma Z., Zhang P., Zhu J. Review on the fatigue properties of 3D woven fiber/epoxy composites: testing and modelling strategies // *Journal of Industrial Textiles*. 2020. No. 51. P. 7755–7795. DOI: 10.1177/1528083720949277.
66. Linke M., Greb C., Klingele J. et al. Automating textile preforming technology for mass production of fibre-reinforced polymer (FRP) composites // *The Global Textile and Clothing Industry / ed. by R. Shishoo*. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2012. P. 171–195. DOI: 10.1533/9780857095626.171.
67. Novello E. Thermomechanical and microscopy Investigation of fatigue damage Development in a 3d e-glass/epoxy woven composite: PhD thesis. Università Degli Studi Di Padova, 2010. 208 p. URL: [https://thesis.unipd.it/bitstream/20.500.12608/19185/1/master\\_thesis\\_Novello.pdf](https://thesis.unipd.it/bitstream/20.500.12608/19185/1/master_thesis_Novello.pdf) (дата обращения: 25.08.2022).

68. El-Dessouky H.M., Saleh M.N., Wang Y., Alotaibi M.S. Effect of Unit-Cell Size on the Barely Visible Impact Damage in Woven Composites // *Applied Sciences*. 2021. No. 11. Art. 2364. DOI: 10.3390/app11052364.
69. Lomov S.V., Truong Chi T., Verpoest I. Mechanical properties of non-crimp fabric (NCF) based composites: stiffness and strength // *Non-Crimp Fabric Composites* / ed. by S.V. Lomov. Amsterdam: Elsevier Science, 2011. P. 263–288. DOI: 10.1533/9780857092533.3.263.
70. Carvelli V., Gramellini G., Lomov S.V. et al. Fatigue behavior of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass reinforced composites // *Composites Science and Technology*. 2010. No. 70. P. 2068–2076. DOI: 10.1016/j.compscitech.2010.08.002.
71. Saleh M.N., El-Dessouky H.M., Saeedifar M. et al. Compression After Multiple Low Velocity Impacts of NCF, 2D and 3D Woven Composites // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019. Vol. 125. Art. 105576. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105576.

### References

1. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports of the XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
2. Kablov E.N., Sagomonova V.A., Sorokin A.E., Tselikin V.V., Gulyaev A.I. Investigation of the structure and properties of a polymer composite material with an integrated vibration-absorbing layer. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2020, no. 3, pp. 2–9.
3. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
4. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
5. Sorokin A.E., Ivanov M.S., Sagomonova V.A. Thermoplastic polymer composite materials based on polyetheretherketones of various manufacturers. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 07, 2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2022-0-1-41-50.
6. Grinevich D.V., Yakovlev N.O., Slavin A.V. The criteria of the failure of polymer matrix composites (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), paper no. 11. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: July 05, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111.
7. Belinis P.G., Donetskii K.I., Lukyanenko Yu.V., Rogozhnikov V.N., Mayer Yu., Bystrikova D.V. Volume reinforcing solid-woven preforms for manufacturing of polymer composite materials (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.
8. Slavin A.V., Silkin A.N., Grinevich D.V., Yakovlev N.O. Composite materials with a 3D-reinforced structure (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 8 (114), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 05, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-113-122.
9. Yakovlev N.O., Davydenko A.N., Monakhov A.D. Damage Criteria for Predicting the Residual Fatigue Life of PCM. *Physical and Mechanical Testing, Strength and Reliability of Modern Structural and Functional Materials: Proceedings of XIV All-Rus. conf. for testing and research of the properties of materials "TestMat"*. Moscow, 2022, pp. 240–249.
10. Yakovlev N.O., Popkova E.A., Landik D.N. Deformation as a criterion for the quality of carbon fiber. *The role of fundamental research in the implementation of the Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030: materials of the VII All-Rus. sci.-tech. conf.* Moscow, 2021, pp. 198–203.
11. Tong L. *3D Fibre Reinforced Polymer Composites*. Elsevier Science, 2002, 254 p.
12. Pankow M.R. *The Deformation Response of 3D Woven Composites Subjected to High Rates of Loading*: PhD thesis. The University of Michigan, 2010, 208 p. Available at: <https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/77889> (accessed: August 25, 2022).

13. Saleh M.N., Yudhanto A., Lubineau G., Soutis C. The effect of z-binding yarns on the electrical properties of 3D woven composites. *Composite Structures*, 2017, no. 182, pp. 606–616. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.081.
14. Saleh M.N., Yudhanto A., Potluri P. et al. Characterising the loading direction sensitivity of 3D woven composites: Effect of z-binder architecture. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, no. 90, pp. 577–588. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.08.028.
15. Sidorina A.I., Safronov A.M., Kutsevich K.E., Klimenko O.N. Carbon fabrics for aircraft products. *Trudy VIAM*, 2020, no. 12 (94), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 05, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58.
16. Lee L., Rudov-Clark S., Mouritz A. et al. Effect of weaving damage on the tensile properties of three-dimensional woven composites. *Composite Structures*, 2002, no. 57, pp. 405–413. DOI: 10.1016/s0263-8223(02)00108-3.
17. Lee B., Leong K.H., Herszberg I. Effect of Weaving on the Tensile Properties of Carbon Fibre Tows and Woven Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2001, no. 20 (8), pp. 652–670. DOI: 10.1177/073168401772679011.
18. Cox B.N., Carter W.C., Fleck N.A. A Binary Model of Textile Composites – I. Formulation. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1994, no. 42, pp. 3463–3479.
19. Callus P.J., Mouritz A.P., Bannister M.K., Leong K.H. Tensile properties and failure mechanisms of 3D woven GRP composites. *Composites*, 1999, no. 30A, pp. 1277–1287.
20. Kuo W.-S., Ko T.-H. Compressive damage in 3-axis orthogonal fabric composites. *Composites*, 2000, no. 31A, pp. 1091–1105.
21. Leong K.H., Lee B., Herszberg I., Bannister M.K. The effect of binder path on the tensile properties and failure of multilayer woven CFRP composites. *Composites Science and Technology*, 2000, no. 60, pp. 149–156.
22. Gerlach R., Siviour C.R., Wiegand J., Petrinic N. In-plane and through-thickness properties, failure modes, damage and delamination in 3D woven carbon fibre composites subjected to impact loading. *Composites Science and Technology*, 2012, no. 72, pp. 397–411. DOI: 10.1016/j.compscitech.2011.11.032.
23. Ding Y.Q., Yan Y., McIlhagger R., Brown D. Comparison of the fatigue behavior of 2D- and 3D-woven fabric reinforced composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, no. 55, pp. 171–177. DOI: 10.1016/0924-0136(95)01950-2.
24. Guess T.R., Reedy E.D. Jr. Comparison of Interlocked Fabric and Laminated Fabric Kevlar 49/Epoxy Composites. *Journal of Composites Technology & Research*, 1985, no. 7, pp. 136–142.
25. Arendts F.J., Drechler K., Brandt J. Advanced textile structural composites – status and outlook. *Proc. of the Int. Conf. on Advanced Composite Materials*. Wollongong, 1993, pp. 409–416.
26. Brandt J., Drechsler K., Arendts F.-J. Mechanical performance of composites based on various three-dimensional woven-fibre preforms. *Composites Science and Technology*, 1996, no. 56, pp. 381–386. DOI: 10.1016/0266-3538(95)00135-2.
27. Lomov S.V., Bogdanovich A.E., Ivanov D.S. et al. A comparative study of tensile properties of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass composites. Part 1: Materials, methods and principal results. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009, no. 40, pp. 1134–1143. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.03.012.
28. Cox B.N., Flanagan G. *Handbook of Analytical Methods for Textile Composites*. Rockwell Science Center, 1996, 161 p.
29. Lee C., Liu D. Tensile strength of stitching joint in woven glass fabrics. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1990, no. 112, pp. 125–130.
30. Farley G.L., Dickinson L.C. Removal of surface loop from stitched composites can improve compression and compression-after-impact strengths. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1992, no. 11, p. 633.
31. Pankow M., Waas A.M., Yen C.-F. Modeling the response of 3D textile composites under compressive loads to predict compressive strength. *Computers, Materials and Continua*, 2012, no. 32, pp. 81–106.

32. Siyuan Y., Xiuhua C. Tension-compression fatigue behavior of 3D woven composites. *IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, no. 388, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899x/388/1/012016.
33. Yakovlev N.O., Gulyaev A.I., Lashov O.A. Crack firmness of layered polymeric composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2016, no. 4, paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 26, 2022) DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-12-12. (дата обращения: 26.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-12-12.
34. Grinevich D.V., Yakovlev N.O., Slavin A.V., Lashov O.A. Peculiarities of modeling the delamination of polymer composite materials during separation. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2022, no. 1, pp. 2–10. DOI: 10.31044/1814-4632-2022-1-2-10.
35. Shershak P.V. National standardization specifics of polymer composites materials tests methods. *Trudy VIAM*, 2019, no. 2 (74), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 26, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-77-88.
36. Wong R. Sandwich construction in the Starship. *Proceedings of the 37th international SAMPE symposium and exhibition*, 1992, pp. 186–197.
37. Mouritz A.P., Bannister M.K., Falzon P.J., Leong K.H. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1999, vol. 30, no. 12, pp. 1445–1461. DOI: 10.1016/S1359-835X(99)00034-2.
38. Byun J.-H., Gillespie J.W., Chou T.-W. Mode I delamination of a three-dimensional fabric composite. *Delamination in Advanced Composites*, 1989, no. 1, pp. 457–478.
39. Guenon V.A., Chou T.-W., Gillespie J.W. Toughness properties of a three-dimensional carbon-epoxy composite. *Journal of Materials Science*, 1989, no. 24, pp. 4168–4175.
40. Stegshuster G., Pingkarawat K., Wendland B., Mouritz A.P. Experimental determination of the mode I delamination fracture and fatigue properties of thin 3D woven composites. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, no. 84, pp. 308–315. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.02.008.
41. Fishpool D.T., Rezai A., Baker D. et al. Interlaminar toughness characterisation of 3D woven carbon fibre composites. *Plastics, Rubber and Composites*, 2013, no. 42, pp. 108–114. DOI: 10.1179/1743289812Y.0000000036.
42. Ladani R.B., Nguyen A.T.T., Wang C.H., Mouritz A.P. Mode II interlaminar delamination resistance and healing performance of 3D composites with hybrid z-fibre reinforcement. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, no. 120, pp. 21–32. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.02.010.
43. Rudov-Clark S., Mouritz A.P. Tensile fatigue properties of a 3D orthogonal woven composite. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008, no. 39, pp. 1018–1024. DOI: 10.1016/j.compositesa.2008.03.001.
44. Pankow M., Waas A.M., Yen C.F., Ghiorse S. Resistance to delamination of 3D woven textile composites evaluated using End Notch Flexure (ENF) tests: Cohesive zone based computational results. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, vol. 42, no. 12, pp. 1863–1872.
45. Chou S., Wu C.-J. A study of the physical-properties of epoxy-resin composites reinforced with knitted glass-fiber fabrics. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1992, no. 11, pp. 1239–1250.
46. Walter T.R., Subhash G., Sankar B.V., Yen C.F. Monotonic and cyclic short beam shear response of 3D woven composites. *Composites Science and Technology*, 2010, no. 70, pp. 2190–2197. DOI: 10.1016/j.compscitech.2010.08.022.
47. Kashif M., Hamdani S.T., Zubair M., Nawab Y. Effect of interlocking pattern on short beam strength of 3D woven composites. *Journal of Composite Materials*, 2019, vol. 53, no. 20, pp. 2789–2799. DOI: 10.1177/0021998319839441.
48. Zhang D., Liu X., Gu Y. et al. Effects of off-axis angle on shear progressive damage of 3D woven composites with X-ray micro-computed tomography. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 53, no. 20, pp. 2789–2799. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.10.007.
49. Zhang D., Liu X., Gu Y. et al. Effects of off-axis angle on shear progressive damage of 3D woven composites with X-ray micro-computed tomography. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, no. 115, pp. 311–320. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.10.007.

50. Wu X.C., Shan Z.D., Liu F., Wang Y. The Effect of Guide Sleeves on Shear Behavior of 3D Weaving Composites. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, no. 597, pp. 89–94. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.597.89.
51. Saleh M.N., Soutis C. Recent advancements in mechanical characterisation of 3D woven composites. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, 2017, no. 3, pp. 1–17. DOI: 10.1186/s40759-017-0027-z.
52. Billaut F., Roussel O. Impact resistance of 3-D graphite/epoxy composites. *Proceedings of the 11 International Conference on Composite Materials*. Woodhead Publishing Ltd, 1995, vol. 5, pp. 551–558.
53. Herrick J.W., Globus R. Impact resistance multidimensional composites. *Proceedings of the 12 National SAMPE Technical Conference*. Seattle, 1980, pp. 845–856.
54. Reedy E.D., Guess T.R. Additional comparisons of interlocked fabric and laminated fabric Kevlar 49/epoxy composites. *Journal of Composites Technology and Research*, 1986, no. 8, pp. 163–168.
55. Susuki I., Takatoya T. Impact damage properties of 3-D carbon/hismaleimide composites. *Proceedings of the 5 Japan Int. SAMPE Symposium*. Tokyo, 28–31 Oct. 1997, pp. 691–696.
56. James B., Howlett S. Enhancement of post impact structural integrity of GFRP composite by through-thickness reinforcement. *Proceedings of the 2nd European Fighting Vehicle Symposium*. Shrivenham, 1997, pp. 543–571.
57. *Ballistic resistant article comprising a three-dimensional interlocking woven fabric*: pat. US 5,456,974; filed 28.02.94; publ. 10.10.95.
58. Walter T.R., Subhash G., Sankar B.V., Yen C.F. Damage modes in 3D glass fiber epoxy woven composites under high rate of impact loading. *Composites. Part B: Engineering*, 2009, no. 40, pp. 584–589. DOI: 10.1016/j.compositesb.2009.04.021.
59. Pankow M., Waas A.M., Yen C.-F. Modeling the response of 3D textile composites under compressive loads to predict compressive strength. *Computers, Materials and Continua*, 2012, no. 32, pp. 81–106.
60. Voss S., Fahmy A., West H. Impact tolerance of laminated and 3 dimensionally reinforced graphite-epoxy panels. *Proceedings of the International Conference on Advanced Composite Materials*, Wollongong, 1993, pp. 591–596.
61. Hart K.R., Chia P.X.L., Sheridan L.E., Wetzel E.D., Sottos N.R., White S.R. Comparison of Compression-After-Impact and Flexure-After-Impact protocols for 2D and 3D woven fiber-reinforced composites. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, no. 101, pp. 471–479. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.07.005.
62. Jin L., Niu Z., Jin B.C. et al. Comparisons of static bending and fatigue damage between 3D angle-interlock and 3D orthogonal woven composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2012, no. 31, pp. 935–945. DOI: 10.1177/0731684412450626.
63. Yu B., Bradley R.S., Soutis C. et al. 2D and 3D imaging of fatigue failure mechanisms of 3D woven composites. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, vol. 77, pp. 37–49.
64. Ruggles-Wrenn M.B., Alnatifat S.A. Fully-reversed tension-compression fatigue of 2D and 3D woven polymer matrix composites at elevated temperature. *Polymer Testing*, 2021, no. 97, art. 107179. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2021.107179.
65. Ma Z., Zhang P., Zhu J. Review on the fatigue properties of 3D woven fiber/epoxy composites: testing and modelling strategies. *Journal of Industrial Textiles*, 2020, no. 51, pp. 7755–7795. DOI: 10.1177/1528083720949277.
66. Linke M., Greb C., Klingele J. et al. Automating textile preforming technology for mass production of fibre-reinforced polymer (FRP) composites. *The Global Textile and Clothing Industry*. Ed. R. Shishoo. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2012, pp. 171–195. DOI: 10.1533/9780857095626.171.
67. Novello E. *Thermomechanical and microscopy Investigation of fatigue damage Development in a 3d e-glass/epoxy woven composite*: PhD thesis. Università Degli Studi Di Padova, 2010, 208 p. Available at: [https://thesis.unipd.it/bitstream/20.500.12608/19185/1/master\\_thesis\\_Novello.pdf](https://thesis.unipd.it/bitstream/20.500.12608/19185/1/master_thesis_Novello.pdf) (accessed: August 25, 2022).

68. El-Dessouky H.M., Saleh M.N., Wang Y., Alotaibi M.S. Effect of Unit-Cell Size on the Barely Visible Impact Damage in Woven Composites. *Applied Sciences*, 2021, no. 11, art. 2364. DOI: 10.3390/app11052364.
69. Lomov S.V., Truong Chi T., Verpoest I. Mechanical properties of non-crimp fabric (NCF) based composites: stiffness and strength. *Non-Crimp Fabric Composites*. Ed. S.V. Lomov. Amsterdam: Elsevier Science, 2011, pp. 263–288. DOI: 10.1533/9780857092533.3.263.
70. Carvelli V., Gramellini G., Lomov S.V. et al. Fatigue behavior of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass reinforced composites. *Composites Science and Technology*, 2010, no. 70, pp. 2068–2076. DOI: 10.1016/j.compscitech.2010.08.002.
71. Saleh M.N., El-Dessouky H.M., Saeedifar M. et al. Compression After Multiple Low Velocity Impacts of NCF, 2D and 3D Woven Composites. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 125, art. 105576. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105576.

*Информация об авторах*

**Гриневи́ч Дми́трий Влади́мирович**, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Донецкий Кирилл Игоревич**, начальник лаборатории, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Шершак Павел Викторович**, заместитель начальника лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Яковлев Николай Олегович**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

*Information about the authors*

**Dmitry V. Grinevich**, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Kirill I. Donetskiy**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Chem.) NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Pavel V. Shershak**, Deputy Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Nikolay O. Yakovlev**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 27.01.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 23.02.2023.

The article was submitted 27.01.2023; approved and accepted for publication after reviewing 23.02.2023.