

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-1-56-66>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖСЛОЕВОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРОШИТЫХ ТОНКОЛИСТОВЫХ ЭПОКСИДНЫХ УГЛЕКОМПОЗИТОВ МЕТОДОМ РАССЛОЕНИЯ КЛИНОМ (РАСКЛИНИВАНИЯ)

© Петр Гордеевич Бабаевский<sup>1</sup>, Артем Юрьевич Синицын<sup>2\*</sup>,  
Николай Викторович Матюшевский<sup>2</sup>, Алексей Геннадьевич Попов<sup>2</sup>,  
Валерий Владимирович Мазур<sup>2</sup>, Анатолий Григорьевич Свиридов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Россия, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

<sup>2</sup> АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», Россия, 249031, Обнинск, Киевское шоссе, д. 15;  
\*e-mail: artarea-web@yandex.ru

*Статья поступила 25 мая 2022 г. Поступила после доработки 23 июня 2022 г.  
Принята к публикации 30 августа 2022 г.*

Методом расслоения клином (расклинивания) в рамках линейной упругой механики разрушения при моде нагружения I с использованием стандартных образцов в виде двойной консольной балки (ДКБ) определены локальные показатели трещиностойкости тонколистового армированного полимерного углекомпозиата (УКМ), прошитого стеклянной и арамидной нитями двойным челночным стежком. Прошивку проводили с различным количеством стежков и строчек при разных направлениях распространения трещины относительно укладки армирующей ткани и строчек прошивки. Установлено, что вне зависимости от типа прошивочной нити и направления прохождения трещины средние и нормированные относительно не прошитых образцов значения параметров локальной трещиностойкости прошитых образцов УКМ в наибольшей степени зависят от области прохождения трещины и плотности (шага) прошивок. Это обуславливает резко выраженную локальность и анизотропию трещиностойкости. Наибольшая устойчивость к распространению трещины наблюдается в областях переплетения нитей прошивок в результате затрат энергии на деформирование и разрыв прошивочных нитей, а наименьшая — в областях между прошивками по стежку или шагу между строчками как при продольном, так и перпендикулярном направлениях распространения трещины относительно укладки ткани и строчек прошивок. Проведена оценка удельных средних значений параметров локальной трещиностойкости прошитых образцов УКМ, отнесенных к одной строчке прошивки при продольном распространении трещины или к одному стежку — при распространении трещины поперек строчек прошивки. Эффект повышения локальной трещиностойкости в областях переплетения нитей оказывается существенно меньшим, а ее снижения в областях стежка и между строчками прошивки — существенно большим. Для объективной оценки трещиностойкости тонколистовых прошитых УКМ рекомендуется определять и использовать конкретные локальные параметры с учетом масштабных эффектов.

**Ключевые слова:** трещиностойкость; мода I; методика расклинивания; углекомпозиаты; вакуумная инфузия; прошивка; анизотропия.

## DETERMINATION OF INTERLAYER CRACK RESISTANCE OF STITCHED THIN-SHEET EPOXY CARBON COMPOSITES USING WEDGE DELAMINATION (WEDGING) TECHNIQUE

© Pyotr G. Babayevsky<sup>1</sup>, Artyom Yu. Sinitsyn<sup>2\*</sup>, Nikolai V. Matyushevsky<sup>2</sup>,  
Alexei G. Popov<sup>2</sup>, Valery V. Mazur<sup>2</sup>, Anatoly G. Sviridov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow Aviation Institute (national research university), 4, Volokolamskoe shosse, 125993, Moscow, Russia.

<sup>2</sup> ORPE A. G. Romashin "Technologiya", 15, Kievskoe Shosse, 249031, Obninsk, Russia; \*e-mail: artarea-web@yandex.ru

*Received May 25, 2022. Revised June 23, 2022. Accepted August 30, 2022.*

The local indices of the crack resistance of a thin-sheet reinforced polymeric carbon composite (CCM) stitched with glass and aramid threads with a double lockstitch were determined by wedging in the framework of linear elastic fracture mechanics under loading mode I using standard samples in the form of a double cantilever beam (DCB). Different number of stitches and stitching lines were used for different directions of crack propagation relative to the laying of the reinforcing fabric and stitches. It is shown that

regardless of the type of stitching thread and the crack propagation direction, the average and normalized (relative to non-stitched samples) values of the local crack resistance parameters of stitched CCM samples mostly depend on the crack propagation area and on the density (pitch) of stitching responsible for a pronounced locality and anisotropy of the crack resistance. The highest resistance to crack propagation is observed in the areas of interweaving of the stitching threads as a result of additional energy consumption for deformation and breaking of stitching threads, and the lowest one is characteristic of the areas between stitches along the stitch or step between lines, both in the longitudinal and perpendicular directions of the crack propagation relative to the laying of the fabric and stitching lines. When evaluating the specific average values of the parameters of the local crack resistance of CCM samples related to one line of stitching with a longitudinal crack propagation or to one stitch when a crack propagates across the stitching lines, the effect of increased local crack resistance in the areas of interlacing of threads turns out to be significantly weaker, whereas this decrease in stitch areas and between the stitching lines is significantly more pronounced. For more accurate assessment of the crack resistance of a thin-sheet stitched CCM, it is advisable to determine and use specific local parameters taking into account scale effects.

**Keywords:** crack resistance; mode I; wedging technique; carbon composites; vacuum infusion; stitching; anisotropy.

## Введение

Элементы конструкций, составной частью которых являются тонколистовые слоистые армированные ПКМ, в первую очередь — УКМ, широко применяют в авиационной, ракетно-космической и другой технике. В самолетостроении такие материалы используют в производстве силовых элементов крыльев, фюзеляжа, оперения (обшивки, лонжероны, шпангоуты, нервюры, стенки), а также элементов и агрегатов, воспринимающих местную нагрузку (закрылки, элероны, щитки, рули, обтекатели), обеспечивая радикальное снижение их весовых характеристик [1 – 5]. Однако такие конструкции обладают статической и усталостной повреждаемостью различного масштаба, прежде всего из-за низкой межслоевой трещиностойкости (устойчивости к критическому и докритическому инициированию и росту межслоевых трещин) слоистых армированных ПКМ как на стадии производства, так и при эксплуатации под действием аэродинамических сил или локальных ударных нагрузок. Это приводит к снижению усталостной и остаточной прочности, живучести и заданных ресурсных характеристик конструкций [6].

Для оценки эффективности разрабатываемых способов повышения устойчивости слоистых ПКМ к расслоению при статических и усталостных нагрузках и создания безопасных элементов авиаконструкций из таких материалов необходима комплексная расчетно-экспериментальная методология [7 – 10]. Основой такой методологии служат экспериментальные методы оценки параметров межслоевой трещиностойкости, базирующиеся на макро- и микромеханических подходах линейной упругой механики разрушения (ЛУМР) [11, 12].

Наиболее простым и экономичным способом повышения межслоевой трещиностойкости тонкослойных ПКМ является трансверсальная прошивка армирующей нитью послойно выложен-

ных армирующих слоев (преформ) в технологии вакуумной инфузии перед пропиткой их связующим [13 – 16]. Данные экспериментальной оценки влияния трансверсальной прошивки на межслоевую трещиностойкость слоистых ПКМ с использованием стандартных образцов типа ДКБ при квазистатическом нагружении по наиболее опасной моде I (раскрытием заданной трещины растяжением ее концов — полубалок) свидетельствуют о возможности ее многократного увеличения [17 – 27]. При этом адекватная оценка влияния типа и параметров прошивки на межслоевую трещиностойкость тонкослойных армированных ПКМ, особенно при высоких степенях прошивки, затруднена тем, что при расслоении прошитых образцов в виде ДКБ повышенные нагрузки, необходимые для раскрытия трещины, приводят к изгибу тонких полубалок, вплоть до излома с возникновением большого крутящего момента и сдвига вблизи кончика трещины [28].

Альтернативный стандартный метод оценки межслоевой трещиностойкости при расслоении по моде I прошитых тонколистовых слоистых ПКМ, в том числе УКМ, — внедрение клина в предварительно заданную трещину в образцах типа ДКБ. Этот метод достаточно широко используют для оценки высокоскоростной (ударной) трещиностойкости слоистых ПКМ, в том числе прошитых [29, 30], однако данных о его применении при квазистатических нагрузках для прошитых слоистых УКМ в литературе не найдено. Преимущество метода состоит в том, что при расслоении тонколистового образца клином концы полубалки не нагружаются растяжением, причем критическое раскрытие трещины всегда постоянно и равно толщине клина. При этом менее вероятно возникновение крутящих и сдвиговых эффектов в вершине трещины, как при растяжении ее концов, хотя возможно специфическое взаимодействие клина с прошивными нитями и не самоподобное распространение растущей

трещины. Для расчета критического параметра трещиностойкости не требуется знание усилия внедрения клина, достаточно контролировать его продвижение и длину подрастающей трещины.

В данной работе предложена методика определения трещиностойкости прошитых слоистых армированных ПКМ расслоением клином стандартных образцов в виде ДКБ. Получены зависимости показателей трещиностойкости от типа и параметров прошивки на примере тонколистового слоистого эпоксидного УКМ с учетом анизотропии армирующей ткани и строчек прошивки.

### Методика и образцы для определения трещиностойкости

Методика определения трещиностойкости прошитых слоистых армированных ПКМ основана на расслаивании клином (расклинивании) плоских образцов в виде ДКБ с трещиной, заданной в направлении их продольной оси (рис. 1, 2). В качестве клина использовали стальную полоску длиной  $l = 100$  мм, шириной  $b = 20$  мм и толщиной  $d = 3$  мм с концевым цилиндрическим

закруглением радиусом  $r$ , равным половине толщины полоски:  $2r = d$ .

Объекты исследования — тонкослойные (толщиной  $2h \approx 1,4 - 1,5$  мм) пластины УКМ размером  $260 \times 250$  мм на основе равнопрочной углеродной ткани Porsher (арт. 3692) из саржевого переплетения и эпоксидного связующего Araldite LY8615/Aradur 8615, прошитые стеклянной нитью марки EC6-139 S280 PTFE и арамидной нитью марки 60 НШТВ (СТО 51605609-007-2015). В качестве контрольной использовали не прошитую пластину.

Пластины изготавливали ручной послойной выкладкой шести слоев армирующей ткани со схемой укладки  $[0]_6$  по основе с прокладкой между третьим и четвертым слоями с двух перпендикулярных друг другу краев по всей ширине пластины полосок полиимидной (ПИ) пленки толщиной 50 мкм и шириной 30 мм для создания начальной межслоевой трещины вдоль и поперек основы ткани. При формировании пластин с прошивкой выложенный пакет ткани на участке без проложенной пленки прошивали стеклянной и

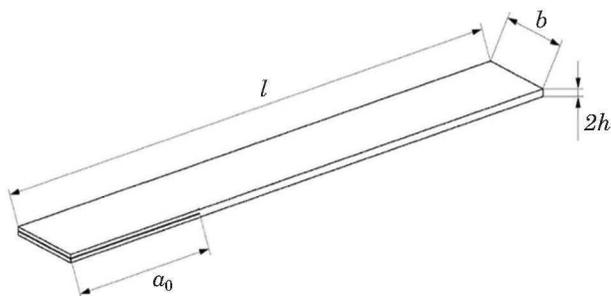


Рис. 1. Общий вид стандартного образца типа ДКБ для определения межслоевой трещиностойкости тонколистовых УКМ (а) и вид испытательного узла для расклинивания образца (б)

Fig. 1. General view of DCB specimen of thin-sheeted CCM for determination interlaminar crack resistance (a); test assembly for sample wedging (b)

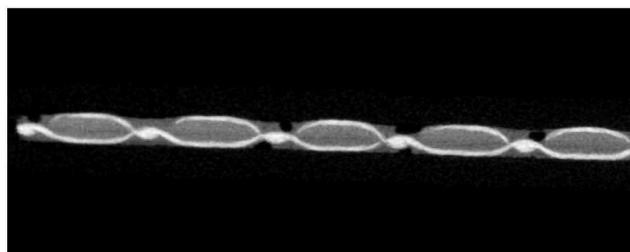
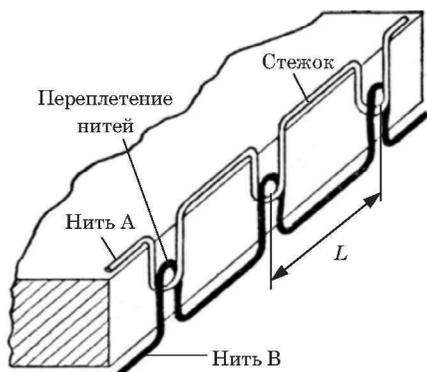


Рис. 2. Схема двухниточного челночного стежка 301 (а) и КТ-снимок торцевого сечения прошитой пластины УКМ (б)

Fig. 2. Double lock stitch layout 301 (a) and CT-image of the transverse section of stitched CCM plate (b)

арамидной нитями с помощью промышленной швейной машины Juki LG-158-1, снабженной специальным приспособлением [31], обеспечивающим фиксацию слоев преформы, и направляющими для обеспечения ровных строчек прошивки. Преформы прошивали двойным челночным стежком типа 301, в котором строчка прошивки образуется из двух ниток — верхней (А) и нижней (В), которые переплетаются в середине прошиваемого слоя. Прошивка таким стежком образует малорастяжимые и трудно распускаемые строчки, достаточно прочные как в продольном, так и в поперечном направлениях, и требует меньшего расхода прошивочных нитей. Расстояние между двумя смежными проколами определяет длину стежка, а расстояние между строчками — шаг прошивки. Прошивку преформ осуществляли вдоль основы армирующей ткани при постоянной длине стежка, равной 6 мм, варьируя шаг прошивки (5, 7 или 10 мм).

После операций выкладки и прошивки преформу устанавливали на предварительно обезжиренную оснастку, полученные пакеты упаковывали в вакуумные мешки и подключали порты подачи связующего и вакуума. В целях снижения трудоемкости и материалоемкости трубки распределения связующего размещали в технологическом припуске преформ между третьим и четвертым слоями с фиксацией их в материале прошивкой [32]. Заготовки пластин пропитывали эпоксидным связующим при комнатной температуре после проведения дегазации связующего и преформы, их отверждение проводили в промышленной печи по стандартному режиму, рекомендуемому производителем связующего.

Кажущуюся плотность, пористость и компонентный состав (соотношение армирующего наполнителя и полимерной матрицы) полученных пластин УКМ определяли методами гелиевой пикнометрии и гидростатического взвешивания,

а модуль упругости при изгибе — по ГОСТ 25.604–82. Полученные данные приведены в табл. 1.

Образцы типа ДКБ для оценки трещиностойкости расклиниванием длиной  $l = 80$  мм, шириной  $b = 15$  мм и толщиной  $2h \approx 1,4 - 1,5$  мм вырезали из полученных пластин вдоль ( $0^\circ$ ) и поперек ( $90^\circ$ ) основы армирующей ткани и строчек прошивки таким образом, чтобы закладные полоски ПИ пленки задавали соответствующее направление прорастания трещины (рис. 3).

Вручную с помощью острого лезвия подрабатывали в вырезанных образцах начальную трещину в месте закладки ПИ пленки и фиксировали образец в подвижном блоке испытательной машины “INSTRON 5900R” (см. рис. 1). Клин устанавливали в неподвижном захвате испытательной машины. Образец расклинивали, вводя клин в трещину и прикладывая к нему осевую нагрузку с заданной скоростью (1 мм/мин), пошагово продвигая в трещине на 0,2 мм. Требуемое усилие фиксировали с помощью датчика испытательной машины. Для регистрации прорастания трещины использовали оптическую систему измерения перемещений клина с возможностью фотофиксации (VIC 3D), оборудованную оптическими линзами с разрешением более 5 Мп. После каждого шага с помощью системы VIC 3D делали снимок фронта трещины (рис. 4).

По полученным снимкам после каждого шага продвижения клина определяли прорастание трещины от точек контакта клина с поверхностью трещины до ее видимого кончика (фронта), используя графический редактор. Длину трещины после каждого шага рассчитывали по формуле

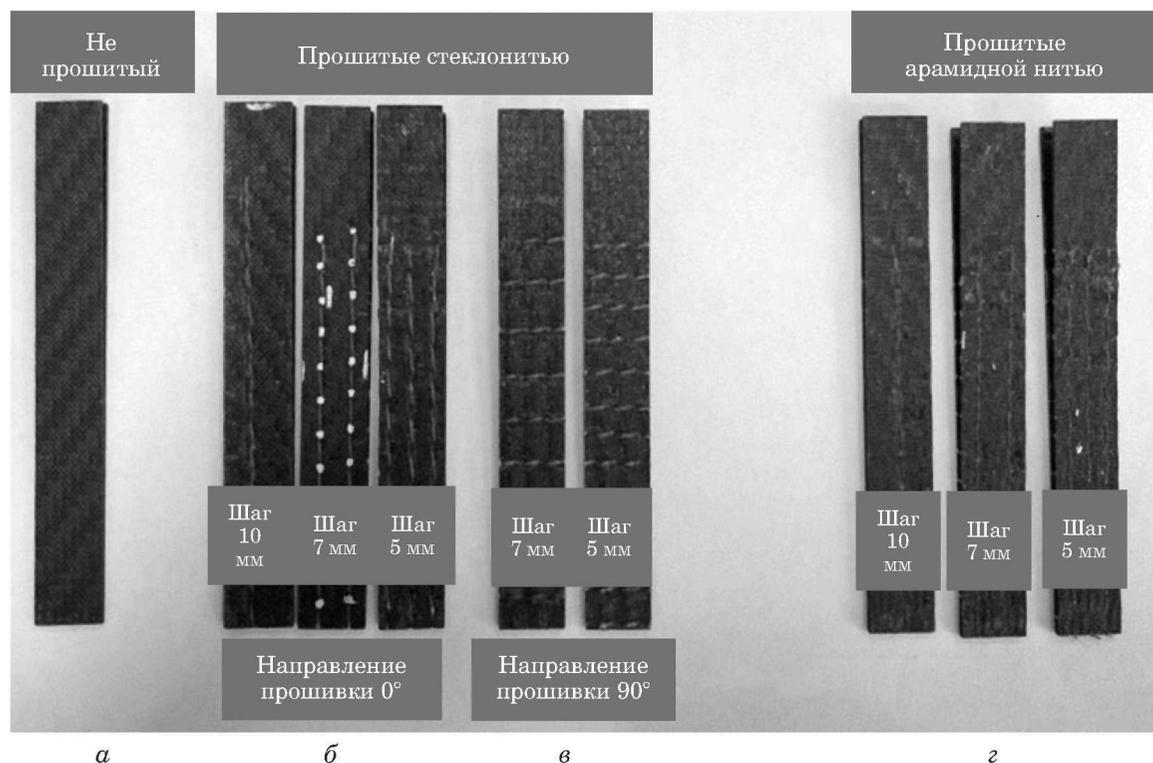
$$a_i = a_{0i} + \Delta_{Ti} - \Delta_{ki} \quad (1)$$

где  $a_{0i}$  — длина трещины  $i$ -го шага до начала продвижения клина;  $\Delta_{Ti}$  и  $\Delta_{ki}$  — смещение фрон-

**Таблица 1.** Состав, плотность, пористость и модуль упругости при изгибе прошитого стекляннй и арамидной нитями и непрошитого тонколистового УКМ

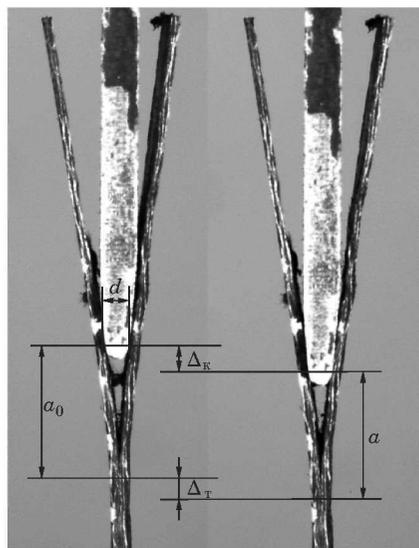
**Table 1.** Composition, density, porosity and flexural modulus of non-stitched and stitched with glass- and aramid threads thin-sheet CCM

УКМ		Соотношение компонентов, % об./% масс.		Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Модуль упругости при изгибе, МПа	
		УВ	Связующее			Вдоль основы ткани ( $0^\circ$ )	Поперек основы ткани ( $90^\circ$ )
Нeproшитый		57,9/65,5	44,4/34,5	1,474	0,7	22,6	23,0
Прoшитый стеклонитью с шагом, мм	10	52,7/63,6	46,7/36,4	1,462	0,6	20,0	16,0
	7	51,3/62,9	46,8/37,1	1,438	1,9	19,7	19,0
	5	51,0/62,8	46,8/37,2	1,435	2,2	22,1	16,0
Прoшитый арамидной нитью с шагом, мм	10	51,2/61,9	48,4/38,1	1,453	0,4	22,0	17,0
	7	49,0/59,9	50,4/40,1	1,436	0,6	22,5	17,0
	5	49,7/60,5	49,9/39,5	1,443	0,4	21,0	18,0



**Рис. 3.** Фотографии образцов типа ДКБ тонколистового слоистого не прошитого (*а*) и прошитого стеклянной (*б*, *в*) и арамидной (*г*) нитями УКМ с направлением распространения трещины: *а* — вдоль основы армирующей ткани ( $0^\circ$ ); *б* — вдоль основы ткани и строчек прошивки ( $0^\circ, 0^\circ$ ); *в* — поперек направления прошивки ( $90^\circ, 90^\circ$ )

**Fig. 3.** Photographs of DCB specimens of thin-sheet laminated non-stitched (*a*), glass thread — stitched CCM (*b*, *c*) and aramid thread-stitched CCM (*d*) for different directions of the crack propagation: *a* — along the reinforcing fabric warp ( $0^\circ$ ); *b* — along the fabric warp and stitches ( $0^\circ, 0^\circ$ ); *c* — normal to the stitching line ( $90^\circ, 90^\circ$ )



**Рис. 4.** Схема измерения прорастания трещины при расклинивании образца

**Fig. 4.** Scheme of crack growth measurements upon wedging of the specimen

та трещины и продвижение клина соответственно на  $i$ -м шаге.

Раскрытие трещины на каждом шаге ее прорастания  $\delta_i$  приравняли к толщине клина в местах его касания с поверхностями трещины:  $\delta_i = 2r = d = \text{const}$ .

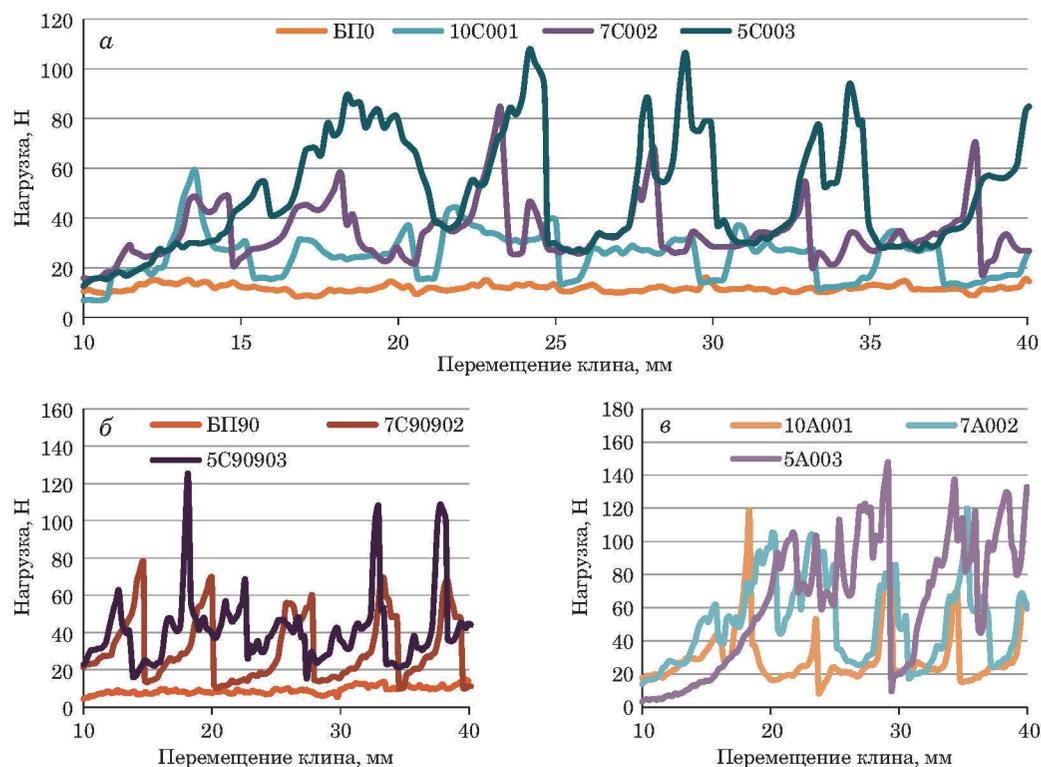
Критическое значение интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины как параметр межслоевой трещиностойкости УКМ рассчитывали по формуле [5]

$$G_{ic} = \frac{3Eh^3\delta_i^2}{16a_i^4}, \quad (2)$$

где  $E$  — модуль упругости материала при изгибе;  $h$  — полутолщина образца;  $\delta_i$  и  $a_i$  — раскрытие и длина трещины на  $i$ -м шаге.

### Обработка и анализ результатов

Для удобства анализа полученных результатов прошитым образцам типа ДКБ присвоены шифры:  $LC(A)_{\varphi_{от}\varphi_{сп}}N$ , где  $L$  — шаг прошивки (мм);  $C(A)$  — стеклянная (aramидная) нить прошивки;  $\varphi_{от}$  и  $\varphi_{сп}$  — направления прорастания трещины вдоль ( $0^\circ$ ) или перпендикулярно ( $90^\circ$ ) основе ткани и строчек прошивки соответственно;  $N$  — количество строчек прошивки по шири-



**Рис. 5.** Зависимости нагрузки от перемещения клина при расклинивании не прошитых и прошитых различными нитями образцов тонкослойного УКМ в различных направлениях: *a* — стеклонить, вдоль основы ткани и строчек прошивки; *б* — стеклонить, перпендикулярно основе ткани и строчкам прошивки; *в* — арамидная нить, вдоль основы ткани и строчек прошивки

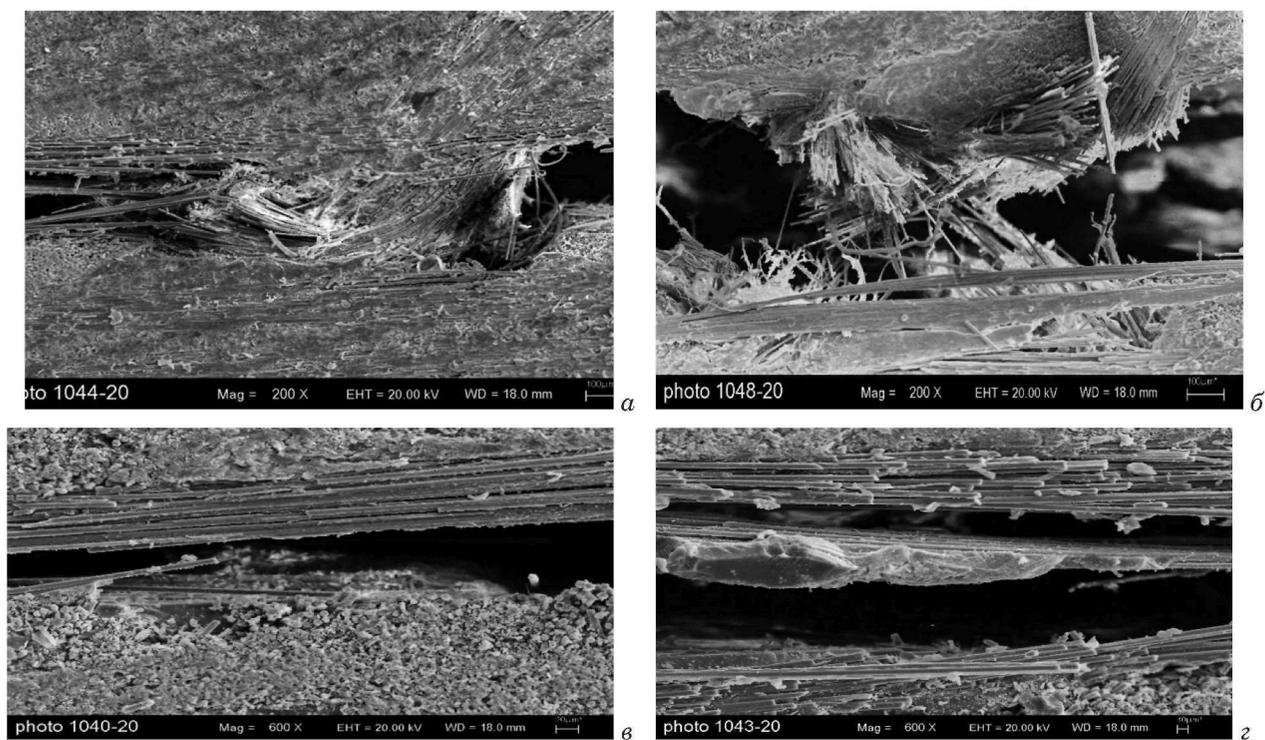
**Fig. 5.** Diagrams of the wedge load-displacement in the non-stitched and stitched specimens of carbon fiber composites (CFCM) in various directions: *a* — fiberglass along the fabric warp and stitches; *b* — fiberglass perpendicular to the fabric warp and stitches; *c* — aramid along the fabric warp and stitches

не образца. Например, шифр 10С001 означает: шаг прошивки 10 мм, нить прошивки — стеклянная, прорастание трещины вдоль основы ткани и строчек прошивки, 1 — одна строчка прошивки в образце. Не прошитые образцы обозначали как БП<sub>от</sub>.

На рис. 5 приведены результаты раскалывания клином не прошитого и прошитых образцов тонкослойного УКМ типа ДКБ в виде зависимостей в координатах прилагаемое усилие-перемещение клина при различном направлении прорастания трещины относительно основы ткани и строчек прошивки. Видно, что при расклинивании не прошитых образцов (см. рис. 5, *a*, *б*, образцы БП0 и БП90) усилие, необходимое для перемещения клина, варьируется случайным образом в сравнительно небольшом интервале (10 – 15 Н). В случае прошитых образцов наблюдается значительно большее и четко выраженное периодическое изменение усилия, минимальные и максимальные значения которого (от 10 до 100 Н и выше) определяются местом прохождения трещины и протекающими при ее прорастании локальными микромеханическими процессами. Сопоставление значений усилия и положения

трещины с учетом характеристик прошивок (см. рис. 5) и электронных микрофотографий трещин в различных областях (рис. 6) показывает, что при заданном направлении распространения трещины максимальные усилия наблюдаются при прохождении трещиной области прошивки (переплетения прошивочных нитей) с деформированием и разрывом нитей (локальная область ЛО1), а минимальные усилия — при распространении трещины вдоль строчек прошивки в области стежка между прошивками или при ее продвижении поперек строчек прошивки в области между строчками после разрушения предыдущего переплетения прошивочных нитей или предыдущей строчки соответственно (локальная область ЛО2). На рис. 7 схематически показаны две области, где протекают основные локальные микромеханические процессы при межслоевом прорастании трещины в тонкослойных прошитых УКМ.

Количественную оценку параметра межслоевой трещиностойкости ( $G_{lc}$ ) исследованных прошитых образцов слоистого УКМ для основных характерных областей прохождения трещины проводили по длине трещины, определяемой от



**Рис. 6.** Сканирующие электронные микрофотографии торцевого среза образца УКМ, прошитого стеклонитью с шагом 10 мм, на участке прошивки при распространении трещины с деформированием (а) и разрушением (б) переплетения прошивочных нитей, а также на участках между прошивками (в) и строчками (г)

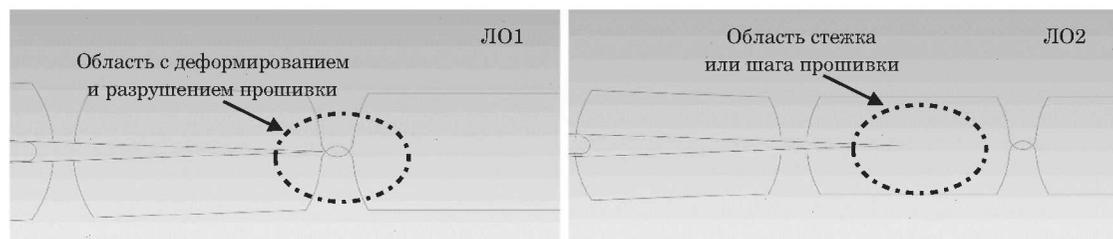
**Fig. 6.** Scanning electron micrography of the crosscut end of the CCM stitched by the glass thread with 10-mm pitch in the zones of the crack propagation accompanied with deformation (a) and breaking (b) of the weaving of stitching threads and in between stitching lines (c, d)

точек контакта клина с поверхностью трещины до ее видимого кончика (фронта) с помощью оптической системы измерения перемещений (VIC 3D) с фотофиксацией положения клина при пошаговом его продвижении, с использованием расчетных формул (1) – (2). Раскрытие трещины в каждом случае принимали равным диаметру закругления клина.

Полученные средние значения локального параметра трещиностойкости  $G_{Ic}$  и их стандартные отклонения, а также нормированные отно-

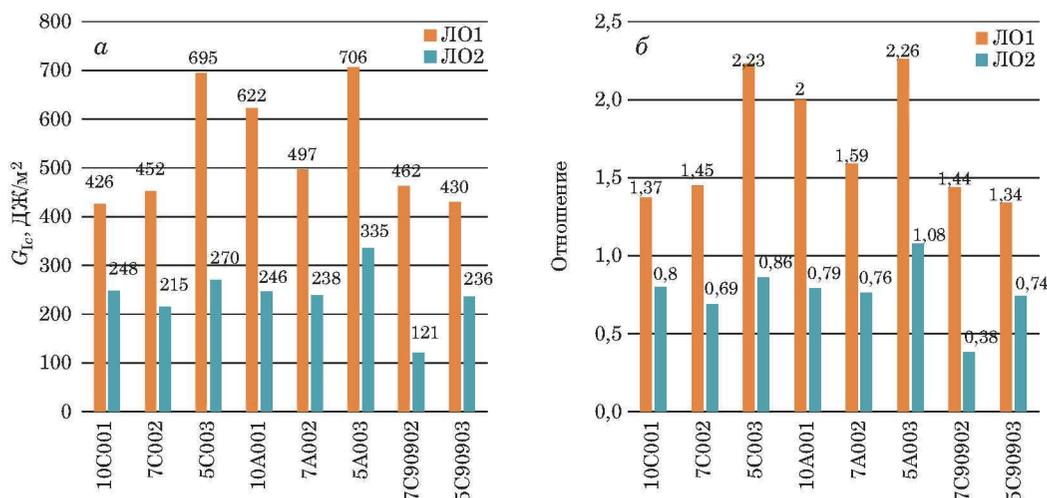
шения средних значений  $G_{Ic}$  прошитых образцов к  $G_{Ic}$  не прошитых образцов в областях ЛО1 и ЛО2 представлены в табл. 2. Их удельные локальные значения, отнесенные к одной строчке (при распространении трещины вдоль строчек прошивки) и к одному стежку (при распространении трещины поперек строчек прошивки) и нормированные отношения  $G_{Ic}$  прошитых и не прошитых образцов — на рис. 8.

Приведенные в табл. 2 данные показывают, что трансверсальная прошивка при заданном



**Рис. 7.** Схема областей основных локальных микромеханических процессов при прорастании трещины в УКМ: а — с деформированием и разрушением отдельных прошивок (ЛО1); б — прохождением трещины между прошивками в стежках или между строчками (ЛО2)

**Fig. 7.** Schematic diagram of the main local micromechanical processes upon crack growth in a thin-layer stitched CCM: а — the arrows indicate the regions of deformation and breaking of some stitching threads (LO1) and (б) the crack propagation between the stitching lines (LO2)



**Рис. 8.** Удельные средние локальные значения  $G_{Ic}$  прошитых образцов в области ЛО1 и ЛО2, отнесенные к одной строчке (при распространении трещины вдоль строчек прошивки) и к одному стежку (при распространении трещины поперек строчек прошивки) (а) и нормированное отношение удельных средних локальных значений  $G_{Ic}$  (б)

**Fig. 8.** Specific mean local  $G_{Ic}$  values of stitched samples in areas LO1 and LO2, related to one line (when a crack propagates along the stitching lines) and to one stitch (when a crack propagates across the stitching lines) (a); normalized ratio of the specific mean local  $G_{Ic}$  values of stitched samples in areas LO1 and LO2 to the same value for non-stitched samples (b)

типе прошивочного стежка обуславливает резко выраженную локальность и анизотропию трещиностойкости тонколистового УКМ, т.е. зависимость сопротивления росту трещины от области и направления прохождения трещины. При заданном типе стежка и прошивочной нити наибольшие средние и удельные значения локальных параметров трещиностойкости исследованных трех типов прошитых образцов тонколистового УКМ в виде ДКБ с различным количеством строчек и стежков в разных направлениях прохождения трещины наблюдаются в областях прошивок (переплетения прошивочных нитей) с деформированием и разрывом нитей. Их мини-

мальные значения, зачастую меньшие, чем для не прошитых образцов, отмечаются при межслоевом распространении трещины вдоль строчек прошивки между прошивками стежка или при ее развитии поперек строчек прошивки в области между строчками. Эти эффекты значительно возрастают с увеличением плотности (количества строчек и стежков) прошивки, причем более резко — при прохождении трещиной области прошивки. Они проявляются несколько заметнее при прошивке арамидной нитью, чем более хрупкой стеклянной нитью, и мало зависят от направления распространения трещины относительно основы армирующей ткани.

**Таблица 2.** Значения  $G_{Ic}$ , Дж/м², и его стандартные отклонения, % (в скобках), определенные по разбросу данных по длине оцениваемой области прорастания трещин в прошитых образцах УКМ типа ДКБ с различными параметрами прошивки, в различных областях (ЛО1, ЛО2) и при различном направлении распространения трещины (числитель) и нормированные отношения средних локальных значений  $G_{Ic}$  прошитых и не прошитых образцов, равных 312(18) и 321(16), при распространении трещины вдоль и перпендикулярно направлению основы ткани соответственно (знаменатель)

**Table 2.** Mean values of the local crack resistance parameter  $G_{Ic}$ , J/m² and standard deviations, % (in brackets), determined from the data spread along the length of the estimated crack growth zone of stitched samples with different parameters of stitching, in different local areas (LO1, LO2) and different directions of crack propagation (numerator), and their normalized ratios  $G_{Ic}$  of non-stitched and stitched samples equal to 312(18) and 321(16), when the crack propagates along and perpendicular to the direction of the fabric base, respectively (denominator)

Область прорастания трещины	Образцы, прошитые стеклянной и арамидной нитями, трещина распространяется вдоль основы ткани и строчек прошивки						Образцы, прошитые стеклянной нитью, трещина распространяется перпендикулярно основе ткани и строчкам прошивки	
	10C001	7C002	5C003	10A001	7A002	5A003	7C90902	5C90903
ЛО1	426 (20)	904 (20)	2084 (24)	622 (22)	994 (21)	2118 (15)	1386 (18)	1290 (19)
	1,37	2,90	6,68	2,00	3,19	6,79	4,32	4,02
ЛО2	248 (24)	430 (12)	809 (24)	246 (24)	477 (27)	1006 (21)	364 (18)	708 (17)
	0,80	1,38	2,59	0,79	1,53	3,23	1,13	2,21

При пересчете общих средних локальных параметров трещиностойкости прошитых образцов в области переплетения прошивочных нитей и областях стежка или между строчками прошивки в удельные средние значения, приходящиеся на одну строчку при продольном распространении трещины или один стежок при распространении трещины поперек строчек прошивки (см. рис. 8), видно, что эффект повышения локальной трещиностойкости в областях переплетения нитей оказывается существенно меньшим, а эффект ее снижения в областях стежка и между строчками прошивки — существенно большим.

## Заключение

Показано, что резко выраженная локальность и анизотропия межслоевой трещиностойкости прошитых тонколистовых слоистых УКМ делает малоэффективной ее оценку стандартными методами при нагружении не только по моде I, но и по другим модам. При заданных типе и плотности прошивки необходимо определять и использовать конкретные локальные параметры с учетом масштаба (размеров) образцов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов Н. В., Соколова А. В., Сеницын А. Ю. Особенности технологии изготовления лонжерона из композиционных материалов методом вакуумной инфузии / Конструкции из композиционных материалов. 2016. № 3. С. 25 – 29.
2. Зимбицкий А. В., Стасюк Ю. В. Применение композиционных материалов в современном авиастроении, контроль за их состоянием в эксплуатации / Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 208. С. 99 – 103.
3. Гуляев Г. М., Кривошей В. В., Румянцев А. Ф., Железина Г. Ф. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов / Конверсия в машиностроении. 2004. № 4. С. 65 – 69.
4. Старокадомский Д. Л., Решетник М. Н. Исследование реставрационных эпоксид-композиатов с исходными и водоотвержденными гипсовыми и цементными наполнителями / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 8. С. 34 – 35. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-8-34-41
5. Полилов А. Н., Власов Д. Д., Татусь Н. А. Проектирование оптимальной формы и структуры армирования образца для корректного определения прочности однонаправленных композитов на растяжение / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 2. С. 43 – 52. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-2-43-55
6. Татусь Н. А., Полилов А. Н., Власов Д. Д. Влияние отверстий на снижение прочности композитных образцов с различной укладкой волокон / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 4. С. 58 – 65. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-4-58-65
7. O'Brien K. T. Development of a Composite Delamination Fatigue Life Prediction Methodology — NASA Technical reports server, 2009. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20090037430/downloads/20090037430.pdf>
8. Bertolini J., Castanié B., Barrau J.-J., Navarro J.-P. Multi-level experimental and numerical analysis of composite stiffener debonding / Composite Structures. 2009. Vol. 90. Part 1: Non-specific specimen level. P. 381 – 391. Part 2: Element and panel level. P. 392 – 403. DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.04.002
9. Матвиенко Ю. Г., Махутов Н. А., Васильев И. Е. и др. Оценка остаточной прочности композитных изделий на основе структурно-феноменологической концепции повреждений и акустико-эмиссионной диагностики / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 1. Ч. I. С. 69 – 70. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-1-I-69-81
10. Оспенникова О. Г., Мараховский П. С., Воробьев Н. Н. и др. Исследование влияния направления армирования на идентификацию релаксационных переходов влагонасыщенного углепластика марки ВКУ-25 / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 9. С. 38 – 43. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-9-38-43
11. Баренблатт Г. И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении / Прикладная механика и теоретическая физика. 1961. № 4. С. 3 – 56.
12. Бабаевский П. Г., Кулик С. Г. Трещиностойкость отвержденных полимерных композиций. — М.: Химия, 1991. — 336 с.
13. Комаров В. А., Одинцова С. А. Влияние пространственного армирования на несущую способность в зонах радиального перехода композитных конструкций / Сборник трудов XIX всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. — Самара, 2017. С. 79 – 82.
14. Бабаевский П. Г., Сеницын А. Ю., Сеницына А. В. Влияние трансверсальной прошивки на деформационно-прочностные характеристики и остаточную прочность после удара слоистого ПКМ на основе равнопрочной углеродной ткани и эпоксидного связующего / Конструкции из композиционных материалов. 2019. № 4. С. 39 – 44.
15. Komarov V. A., Pavlov A. A., Pavlova S. A., Charkviani R. V. Reinforcement of aerospace structural elements made of layered composite materials / Procedia Engineering. 2017. Vol. 185. P. 126 – 130. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.329
16. Куперман А. М., Зеленский Э. С. Исследование возможности увеличения упруго-прочностных характеристик композитов путем их трехмерного армирования / Механика композиционных материалов и конструкций. 2001. Т. 7. № 4. С. 434 – 444.
17. Kimberley A., Dansfield, Lalit K. Jain, Yiu-Wing Mai. On the effects of stitching in CFRPs — I. MODE I delamination toughness / Composites Science and Technology. 1998. Vol. 58. P. 815 – 827. DOI: 10.1016/s0266-3538(97)00229-7
18. Rys T. P., Chen L., Sankar B. V. Mixed Mode Fracture Toughness of Laminated Stitched Composites / Abstract of thesis. Department of Mechanical and Aerospace Engineering. [https://www.researchgate.net/publication/267771874\\_Mixed\\_Mode\\_Fracture\\_Toughness\\_of\\_Laminated\\_Stitched\\_Composites](https://www.researchgate.net/publication/267771874_Mixed_Mode_Fracture_Toughness_of_Laminated_Stitched_Composites)
19. Wood M., Sun X., Tong L., et al. The effect of stitch distribution on Mode I delamination toughness of stitched laminated composites — experimental results and FEA simulation / Composites Science and Technology. 2007. Vol. 67. P. 1058 – 1072. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.06.002
20. Pingkarawat K., Mouritz A. P. Stitched mendable composites: Balancing healing performance against mechanical performance / Composite Structures. 2015. Vol. 123. P. 54 – 64. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.12.034
21. Ghasemnejad H. Interlaminar Fracture Toughness of stitched FRP Composites / Computers and Mathematics in Automation and Materials Science. 2014. P. 93 – 96. <https://www.semanticscholar.org/paper/Interlaminar-Fracture-Toughness-of-Stitched-FRP-Ghasemnejad/b5a4ba8bae64a5013fede7dd57530854b3642d67>
22. Tarfaoui M., Hamitche L., Khamassi S., Shah O. Examination of the Delamination of a Stitched Laminated Composite with Experimental and Numerical Analysis Using Mode I Interlaminar / Arabian Journal for Science and Engineering. 2020. Vol. 45. P. 5873 – 5882. DOI: 10.1007/s13369-020-04599-z
23. Stegschuster G., Pingkarawat G., Wendland B., Mouritz A. P. Experimental determination of the mode I delamination fracture and fatigue properties of thin 3D woven composites / Composites: Part A. 2016. Vol. 84. P. 308 – 315. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.02.008

24. **Goktas D., Kennon W. R., Potluri P.** Improvement of Mode I Interlaminar Fracture Toughness of stitched G्लाа/Epoxy Composites / *Appl Compos Mater.* 2017. P. 351 – 375. DOI: 10.1007/s10443-016-9560-x
25. **Abdelal N. R., Donaldson S. L.** Interlaminar fracture toughness and electromagnet interference shielding of hybrid-stitched carbon fiber composites / *Journal of Reinforced Plastics and Composites.* 2018. Vol. 0. N 0. P. 1 – 11. DOI: 10.1177/0731684418787642
26. **Ravandi M., Teo W. S., Yong M. S., Tay T. E.** Prediction of Mode I interlaminar fracture toughness of stitched flax fiber composites / *Journal of Materials Science.* 2018. Vol. 53. P. 4173 – 4188. DOI: 10.1007/s10853-017 – 1859-y
27. **Abdelal N. R., Donaldson S. L.** The Effect of Stitching with Conductive and Nonconductive Materials on the Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Carbon Fiber Composites / *Polymer Composites.* 2018. Vol. 40. P. 1 – 11. DOI: 10.1002/pc.24958
28. **Drake D., Sullivan R., Lovejoy A., et al.** Influence of stitching on the out-of-plane behavior of composite materials — A mechanistic review / *Journal of Composite Materials.* 2021. Vol. 55(23). P. 3307 – 3321. DOI: 10.1177/00219983211009290
29. **Ponnusami S. A., Hao Cui, Erice B., et al.** A Wedge-DCB Test Methodology to Characterize High Rate Mode-I Interlaminar Fracture Properties of Fibre Composites / *EPJ Web of Conferences.* 2018. DOI: 10.1051/epjconf/201818302052
30. **Riezzo M. A., Simmons M., González C., Sket F.** Dynamic characterization of interlaminar toughness in carbon fibre epoxy composite laminates / 18<sup>th</sup> European Conference on Composite Materials. Greece. Athens. 2018. <https://az659834.vo.msecnd.net/eventsairwesteuprod/production-pcoconvin-public/b0c02cb638a647e791ce853c2c19392c>
31. Пат. 2627882 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> B29C 70/08 (2006.01). Способ изготовления изделия из композиционного материала / Степанов Н. В., Соколова А. В., Синицын А. Ю., Мазур В. В., Портнова Я. М.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А. Г. Ромашина. — № 2016115135; заявл. 19.04.2016; опублик. 14.08.2017. Бюл. № 23.
32. Пат. 2626413 Российская федерация, МПК<sup>7</sup> B29C 70/44 (2006.01). Способ изготовления пропитанных смолой деталей из композиционного материала / Степанов Н. В., Соколова А. В., Войлочников А. И., Алексеев Р. А., Синицын А. Ю.; заявитель и патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации (Минпромторг России) — № 2016108244; заявл. 09.03.2016; опублик. 27.07.2017. Бюл. № 21.
3. **Stepanov N. V., Sokolova A. V., Sinitsyn A. Yu.** Specific features of the composite spar manufacturing technology by the vacuum infusion method / *Konstr. Kompoz. Mater.* 2016. N 3. P. 25 – 29 [in Russian].
2. **Zimbitskii A. V., Stasyuk Yu. V.** Use of composite materials in modern aircraft engineering, and monitoring of their condition in operation / *Nauch. Vestn. MGTU GA.* 2014. N 208. P. 99 – 103 [in Russian].
3. **Gunyaev G. M., Krivoshei V. V., Rumyantsev A. F., Zhelezina G. F.** Polymer composite materials in aircraft structures / *Konvers. Mashinostr.* 2004. N 4. P. 65 – 69 [in Russian].
4. **Starokadomsky D. L., Reshetnyk M. N.** Study of restoration epoxy composites with initial and water-cured fillers / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2021. Vol. 87. N 8. P. 34 – 35 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-8-34-41
5. **Polilov A. N., Vlasov D. D., Tatus' N. A.** Developing of the optimal shape and reinforcement structure of the specimen for adequate determination of the tensile strength in unidirectional composites / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2021. Vol. 87. N 2. P. 43 – 52 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-2-43-55
6. **Tatus' N. A., Polilov N. A., Vlasov D. D.** The impact of holes on the reduction of the strength of composite specimens with different laying of fibers / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2022. Vol. 88. N 4. P. 58 – 65 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-4-58-65
7. **O'Brien K. T.** Development of a Composite Delamination Fatigue Life Prediction Methodology — NASA Technical reports server, 2009. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20090037430/downloads/20090037430.pdf>
8. **Bertolini J., Castanié B., Barrau J.-J., Navarro J.-P.** Multi-level experimental and numerical analysis of composite stiffener debonding / *Composite Structures.* 2009. Vol. 90. Part 1: Non-specific specimen level. P. 381 – 391. Part 2: Element and panel level. P. 392 – 403. DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.04.002
9. **Matvienko Y. G., Makhutov N. A., Vasil'ev I. E., et al.** Evaluation of the residual strength of composite products based on the structural-phenomenological concept of damage and acoustic-emission diagnostics / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2022. Vol. 88. N 1. Part I. P. 69 – 70 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-1-I-69-81
10. **Ospennikova O. G., Marakhovskiy P. S., Vorobyov N. N., et al.** Study of the effect of the reinforcement direction on the identification of relaxation transitions of moisture-saturated carbon fiber VKU-25 / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2021. Vol. 87. N 9. P. 38 – 43 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-9-38-43
11. **Barenblatt G. I.** Mathematical theory of equilibrium cracks formed in brittle failure / *Prikl. Matem. Teor. Fiz.* 1961. N 4. P. 3 – 56 [in Russian].
12. **Babayevskii P. G., Kulik S. G.** Crack resistance of cured polymer compositions. — Moscow: Khimiya, 1991. — 336 p. [in Russian].
13. **Komarov V. A., Odintsova S. A.** Effect of three-dimensional reinforcement on the bearing capacity in the radial transition areas of composite structures / *Proceedings of the XIX All-Russian seminar on traffic control and navigation of aircraft.* — Samara, 2017. P. 79 – 82 [in Russian].
14. **Babaevskii P. G., Sinitsyn A. Yu., Sinitsyna A. V.** Effect of transversal stitching on stress-strain behavior and residual impact strength of laminated polymer composites based on full-strength carbon fabric and epoxy binder / *Konstr. Kompoz. Mater.* 2019. N 4. P. 39 – 44 [in Russian].
15. **Komarov V. A., Pavlov A. A., Pavlova S. A., Charkviani R. V.** Reinforcement of aerospace structural elements made of layered composite materials / *Procedia Engineering.* 2017. Vol. 185. P. 126 – 130. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.329
16. **Kuperman A. M., Zelenskii E. S.** Research on the possibility of improving stress-strain behavior of composites by three-dimensional reinforcement thereof / *Mekh. Kompoz. Mater. Konstr.* 2001. Vol. 7. N 4. P. 434 – 444 [in Russian].
17. **Kimberley A., Dansfield, Lalit K. Jain, Yiu-Wing Mai.** On the effects of stitching in CFRPs — I. MODE I delamination toughness / *Composites Science and Technology.* 1998. Vol. 58. P. 815 – 827. DOI: 10.1016/s0266-3538(97)00229-7
18. **Rys T. P., Chen L., Sankar B. V.** Mixed Mode Fracture Toughness of Laminated Stitched Composites / *Abstract of thesis.* 2004. Department of Mechanical and Aerospace Engineering. [https://www.researchgate.net/publication/267771874\\_Mixed\\_Mode\\_Fracture\\_Toughness\\_of\\_Laminated\\_Stitched\\_Composites](https://www.researchgate.net/publication/267771874_Mixed_Mode_Fracture_Toughness_of_Laminated_Stitched_Composites)
19. **Wood M., Sun X., Tong L., et al.** The effect of stitch distribution on Mode I delamination toughness of stitched laminated composites — experimental results and FEA simulation / *Composites Science and Technology.* 2007. Vol. 67. P. 1058 – 1072. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.06.002
20. **Pingkarawat K., Mouritz A. P.** Stitched mendable composites: Balancing healing performance against mechanical performance / *Composite Structures.* 2015. Vol. 123. P. 54 – 64. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.12.034
21. **Ghasemnejad H.** Interlaminar Fracture Toughness of stitched FRP Composites / *Computers and Mathematics in Automation and Materials Science.* 2014. P. 93 – 96. <https://www.semanticscholar.org/paper/Interlaminar-Fracture-Toughness-of-Stitched-FRP-Ghasemnejad/b5a4ba8bae64a5013fede7dd57530854b3642d67>

## REFERENCES

22. **Tarfaoui M., Hamitoché L., Khamassi S., Shah O.** Examination of the Delamination of a Stitched Laminated Composite with Experimental and Numerical Analysis Using Mode I Interlaminar / *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020. Vol. 45. P. 5873 – 5882. DOI: 10.1007/s13369-020-04599-z
23. **Stegschuster G., Pingkarawat G., Wendland B., Mouritz A. P.** Experimental determination of the mode I delamination fracture and fatigue properties of thin 3D woven composites / *Composites: Part A*. 2016. Vol. 84. P. 308 – 315. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.02.008
24. **Goktas D., Kennon W. R., Potluri P.** Improvement of Mode I Interlaminar Fracture Toughness of stitched G/epoxy Composites / *Appl Compos Mater*. 2017. P. 351 – 375. DOI: 10.1007/s10443-016-9560-x
25. **Abdelal N. R., Donaldson S. L.** Interlaminar fracture toughness and electromagnetic interference shielding of hybrid-stitched carbon fiber composites / *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2018. Vol. 0. N 0. P. 1 – 11. DOI: 10.1177/0731684418787642
26. **Ravandi M., Teo W. S., Yong M. S., Tay T. E.** Prediction of Mode I interlaminar fracture toughness of stitched flax fiber composites / *Journal of Materials Science*. 2018. Vol. 53. P. 4173 – 4188. DOI: 10.1007/s10853-017 – 1859-y
27. **Abdelal N. R., Donaldson S. L.** The Effect of Stitching with Conductive and Nonconductive Materials on the Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Carbon Fiber Composites / *Polymer Composites*. 2018. Vol. 40. P. 1 – 11. DOI: 10.1002/pc.24958
28. **Drake D., Sullivan R., Lovejoy A., et al.** Influence of stitching on the out-of-plane behavior of composite materials — A mechanistic review / *Journal of Composite Materials*. 2021. Vol. 55(23). P. 3307 – 3321. DOI: 10.1177/00219983211009290
29. **Ponnusami S. A., Hao Cui, Erice B., et al.** A Wedge-DCB Test Methodology to Characterise High Rate Mode-I Interlaminar Fracture Properties of Fibre Composites / *EPJ Web of Conferences*. 2018. DOI: 10.1051/epjconf/201818302052
30. **Riezzo M. A., Simmons M., González C., Sket F.** Dynamic characterization of interlaminar toughness in carbon fibre epoxy composite laminates / 18<sup>th</sup> European Conference on Composite Materials. Greece. Athens. 2018. <https://az659834.vo.msecnd.net/eventsairwesteuprod/production-pcoconvin-public/b0c02cb638a647e791ce853c2c19392c>
31. RF Pat. 2627882, V29C 70/08 (2006.01). Method of manufacturing a composite article / Stepanov N. V., Sokolova A. V., Sinitsyn A. Yu., Mazur V. V., Portnova Ya. M.; State Research Center of the Russian Federation “A. G. Romashin ORPE “Tekhnologiya”. — N 2016115135; Publ. August 14, 2017 [in Russian].
32. RF Pat. 2626413, V29C 70/44 (2006.01). Method of manufacturing resin-impregnated composite articles / Stepanov N. V., Sokolova A. V., Voilochnikov A. I., Aleksanyan R. A., Sinitsyn A. Yu.; applicant and patent holder of the Russian Federation on behalf of which the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation. — N 2016108244; Publ. July 27, 2017 [in Russian].