

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТВЕРСТИЙ И ДЕФЕКТОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛОИСТОГО ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА

© 2024

**А. Л. Асси** аспирант кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [ttukasi@mail.ru](mailto:ttukasi@mail.ru)

**А. В. Болдырев** доцент, доктор технических наук, заведующий кафедрой конструкции и проектирования летательных аппаратов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [boldirev.av@ssau.ru](mailto:boldirev.av@ssau.ru)

**А. А. Павлов** кандидат технических наук, ассистент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов, инженер научно-образовательного центра авиационных конструкций; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [alex-alex.pavlov@yandex.ru](mailto:alex-alex.pavlov@yandex.ru)

Разработана методика экспериментальных исследований механических характеристик слоистого полимерного композита с учётом технологических отверстий и дефектов. Представлены результаты экспериментального определения механических характеристик, исследовано влияние материала наполнителя, типа переплетения тканевого волокна, технологических отверстий и производственных дефектов на механические характеристики слоистого углепластика. Испытательные образцы изготовлены из углеткани 200P, 200T, АСМ С300Х и связующего «Инжект SL(B)». Выполнены статические испытания образцов на одноосное растяжение, сжатие и на трёхточечный изгиб.

*Экспериментальное исследование; слоистый углепластик; статические испытания; влияние отверстия; тип наполнителя; технологический дефект; коэффициент вариации*

---

**Цитирование:** Асси А.Л., Болдырев А.В., Павлов А.А. Экспериментальное исследование влияния технологических отверстий и дефектов на механические характеристики слоистого полимерного композита // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 2. С. 74-88. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-2-74-88

### Введение

Процесс применения композиционных материалов в инженерных конструкциях начался в 1970-е годы [1]. В настоящее время эти материалы всё больше используются в аэрокосмической, судостроительной, автомобильной промышленности [2 – 6]. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе углеродного волокна представляют собой один из наиболее перспективных типов конструкционных материалов благодаря их высоким удельным физико-механическим свойствам (удельной прочности и жёсткости).

Конструкции из ПКМ снабжены технологическими отверстиями различного назначения в зонах болтовых и заклёпочных соединений деталей и узлов, портов доступа для обслуживания электрических линий, гидравлической и топливной системы и т.п. Наличие отверстий часто приводит к местной потере устойчивости и высокой концентрации напряжений в этих зонах [7; 8], снижая жёсткость и прочность конструкции [9]. Материал наполнителя, ориентация слоёв в композите, толщина пакета являются параметрами, влияющими на его удельные характеристики [10].

Дефекты в композитном изделии, допущенные при его изготовлении также являются одним из факторов, влияющих на работоспособность конструкции. Использование при изготовлении изделий из композиционных материалов несовершенного оборудования и системы управления, не обеспечивающей заданную точность поддержания параметров технологического процесса, приводит к возникновению в структуре материала конструкции дефектов, вызывающих снижение физико-механических характеристик или увеличение их разброса, снижение несущей способности конструкции и другие отрицательные эффекты [11].

Одним из методов проектирования конструкции композитного изделия является «Building Block Approach (BBA)» [12]. Этот метод включает в себя четыре этапа – от определения упруго-прочностных характеристик конструкционных материалов до создания прототипа изделия. На первом этапе проводятся экспериментальные и численные исследования для создания базы данных упруго-прочностных свойств конструкционных материалов. Второй этап заключается в валидации свойств материалов в типовых элементах конструкции. Третий этап состоит в конструировании и испытаниях агрегатов. Четвертый этап заключается в разработке прототипа изделия на основе базы данных свойств конструкционных материалов и выбранного технологического процесса. Метод BBA накапливает и использует совокупность экспериментальных данных и информации, полученной на подробных верифицированных математических моделях. Для цифрового расчёта напряжённо-деформированного состояния композитной конструкции необходимо предварительно определить упругие характеристики применяемого для её изготовления материала [13].

Целью настоящей работы является разработка и апробирование методики экспериментальных исследований механических характеристик ПКМ с учётом технологических отверстий и производственных дефектов.

### Методика исследований

Методика исследований включает следующие этапы: постановка технического задания на основе нормативных документов; изготовление образцов; проведение испытаний для определения упругих и прочностных характеристик композитных пластин при растяжении, сжатии и изгибе; обработка и анализ результатов для оценки влияния технологических отверстий и производственных дефектов на механические характеристики композитов.

Методика разработана на основе нормативных документов ГОСТ 25.601-80, ASTM D3039/D3039M и ГОСТ P56810-2015 [14 – 16] для определения упругих и прочностных характеристик композитных изделий. Исследование влияния технологических отверстий на механические свойства образцов выполнено по ГОСТ 33375-2015, ГОСТ 33495-2015 и стандарту ASTM D7137/D7137M-12 [17 – 19].

Сущность метода определения механических характеристик композита по ГОСТ 25.601-80 и ASTM D3039/D3039M состоит в испытаниях образцов на растяжение с постоянной скоростью деформирования, при котором определяются следующие величины:  $F_{\max}$  – максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца при растяжении;  $\sigma_B$  – предел прочности при растяжении;  $\varepsilon$  – относительная деформация;  $E$  – модуль упругости при растяжении;  $\mu$  – коэффициент Пуассона. Испытание на растяжение по ГОСТ 25.601-80 и ASTM D3039/D3039M в работе обозначено «P1».

Способ определения характеристик композита при трёхточечном изгибе по ГОСТ P56810-2015 и ASTM D790-17 [20] заключается в нагружении плоского образца постоянного прямоугольного сечения, свободно лежащего на двух опорах, с постоянной скоростью нагружения до момента его разрушения. При испытаниях на трёхточечный из-

гиб определяется предел прочности  $\sigma_B^H$ ; относительная деформация  $\varepsilon^H$  и модуль упругости  $E^H$ .

Исследование влияния отверстия на прочность композитного изделия по ГОСТ 33375-2015 заключается в кратковременном испытании образца с центральным вырезом на растяжение с постоянной скоростью деформации, при которой определяются пределы прочности образца с учётом площади отверстия и без учёта площади отверстия. Испытание на растяжение по ГОСТ 33375-2015 в работе обозначено «Р2».

Исследование влияния отверстия на прочность композитного изделия по стандарту ASTM D7137/D7137M-12 заключается в испытании на одноосное сжатие с постоянной скоростью деформации образца с центральным вырезом, при которой определяют предел прочности  $\sigma_B^{СЖ}$  – напряжение, соответствующее разрушающей нагрузке  $P_{\max}^{СЖ}$  при сжатии.

Нужно отметить, что диаметр отверстия в образце для испытаний на сжатие может быть выбран на основе критерия эквивалентного отверстия, который предполагает, что поврежденный образец может быть заменен аналогичным с эквивалентным отверстием для определения его остаточной прочности (рис. 1) [21]. В соответствии с сертификационными требованиями вводится понятие идеализированного размера повреждения в виде отверстия с радиусом  $r$ , который находится по формуле:

$$2r = 2\sqrt{\eta S/\pi}, \tag{1}$$

где  $S$  – площадь зоны повреждения, определяемая визуально;  $\eta$  – корректирующий коэффициент, учитывающий наличие зоны растрескивания и разрыва волокон, окружающей видимую часть повреждения.

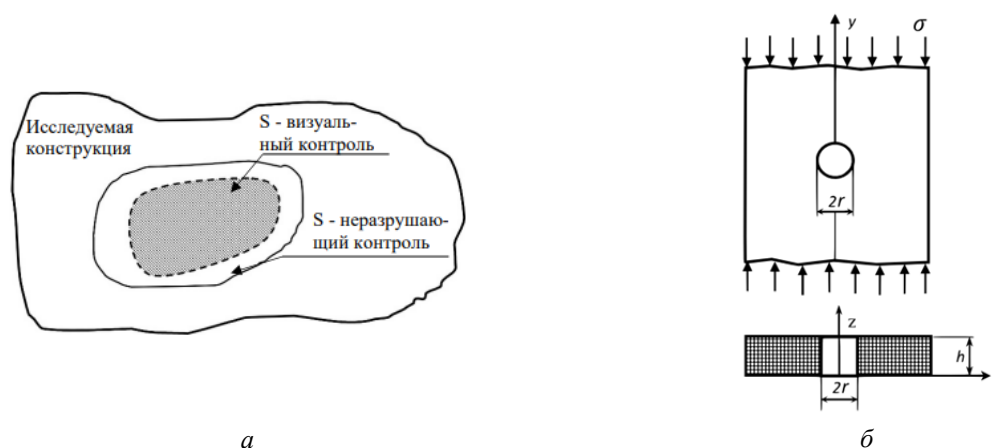


Рис. 1. Изображение эквивалентного отверстия:  
 а – размеры замеренного и действительного повреждения; б – характерные размеры отверстия

Испытательные образцы представляют собой прямоугольные пластины с размерами:  $L$  – длина;  $L_0$  – длина рабочей зоны;  $b$  – ширина;  $h$  – толщина. Для исследования влияния выреза образец снабжён отверстием с диаметром  $2r$ . Типовые размеры образцов (рис. 2) представлены в табл. 1. На рис. 3 показаны схемы нагружения образцов силой  $F$ .

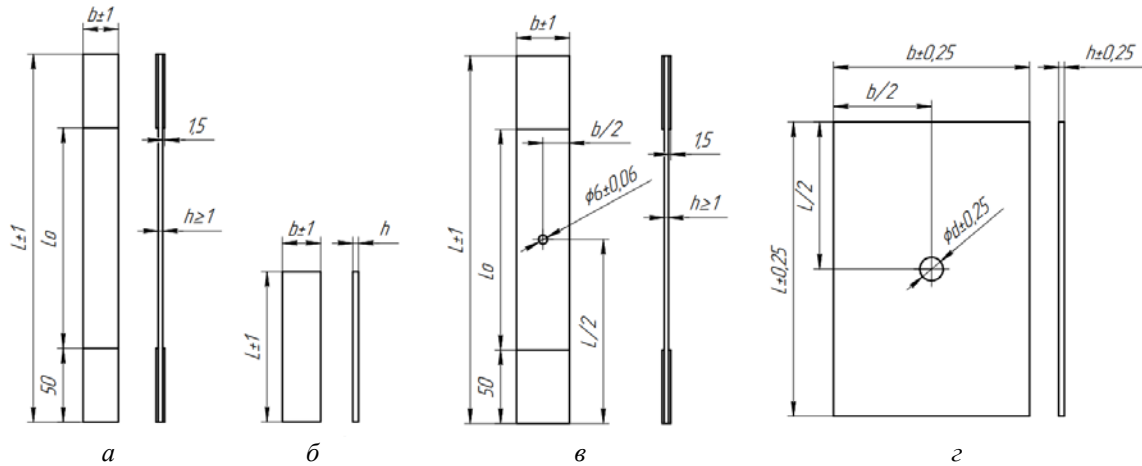


Рис. 2. Типовые образцы:  
а – для испытания на растяжение P1; б – для испытания на трёхточечный изгиб;  
в – для испытания на растяжение P2; г – для испытания на сжатие

Таблица 1. Типовые размеры испытательных образцов по виду нагружения

№	Вид нагружения	Стандарт	Образец (рис. 2)	L, мм	L <sub>0</sub> , мм	b, мм	h, мм	2r, мм
1	Растяжение P1	ASTM D3039/D3039M	а	250±1	150	20±1	≥1	0
2	Трёхточечный изгиб	ГОСТ P56810-2015	б	51±1	–	13±1		0
3	Растяжение P2	ГОСТ 33375-2015	в	200±1	100	36±1		6±0,06
4	Сжатие	ASTM D7137/D7137M-12	г	150±0,25	–	100±0,25		12±0,25

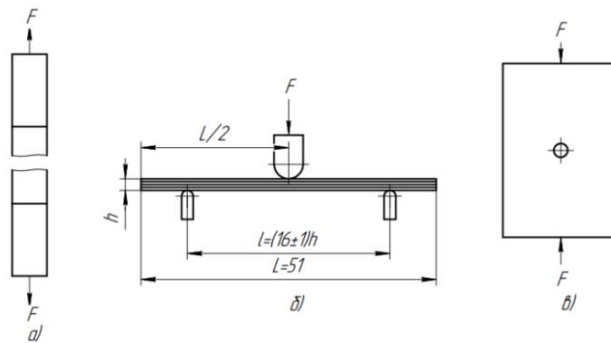


Рис. 3. Схемы нагружения образцов:  
а – при растяжении; б – при трёхточечном изгибе; в – при сжатии

Статистическая оценка сходимости результатов испытаний проводится на основе анализа коэффициента вариации CV [14; 15]:

$$CV = 100 \frac{S_{n-1}}{\bar{x}}, \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right), \quad (3)$$

$$S_{n-1} = \sqrt{\left( \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right) / (n-1)}, \quad (4)$$

где  $x_i$  – определяемая характеристика;  $n$  – количество образцов;  $\bar{x}$  – среднее значение;  $S_{n-1}$  – стандартное отклонение.

### Изготовление испытательных образцов

Объектами исследования выступили образцы на основе связующего «Инжект SL(B)» и углетканей. Инжект SL(B) – это прозрачный низковязкий двухкомпонентный эпоксидный компаунд, предназначенный для изготовления стекло- и углепластиковых изделий методом вакуумной инфузии, RTM-технологии, вакуумного формования<sup>1</sup>. Основные паспортные характеристики используемых тканей представлены в табл. 2.

Таблица 2. Паспортные характеристики тканей

Род материала	Наименование	Волокно	Тип плетения	Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	Толщина слоя, мм	Направление волокон, °
Углеткань	200P	3K Toray	Полотно	200	0,2	0/90
	200T	3K Toray	Саржа 2×2	200	0,20 ± 5%	0/90
	АСМ С300Х	12K Grafil	Биаксиал	308	0,5	–45/+45

Изготовление образцов проводилось в научно-технологическом центре композиционных материалов (НТЦ КМ) Самарского университета, согласно разработанному процессу: формование заготовок, нарезание образцов и маркировка. Формование заготовок осуществлялось методом вакуумной инфузии при вакууме в резервуаре в диапазоне 10...15 мбар. Во время подачи связующего компонента герметизация одной из матриц разрушалась, вызывая попадание воздуха в оснастку. На рис. 4 показаны заготовки без дефектов формования и с дефектом формования. Образцы, нарезанные из заготовок с производственным дефектом, испытывались для определения степени влияния данного типа дефекта на механические характеристики композита.

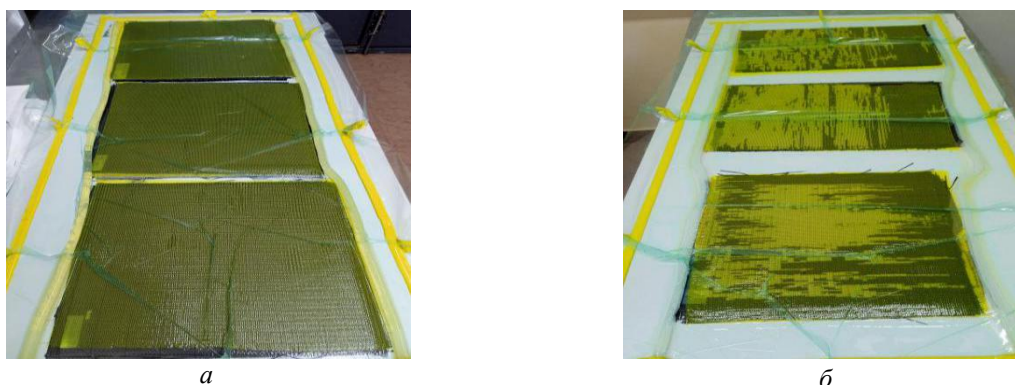


Рис. 4. Формовка заготовок: а – без дефекта формования; б – с дефектом формования

<sup>1</sup> Каталог продукции ХимСнаб Композит. Эпоксидная смола – Карбон М Эпоксидная смола + отвердитель.  
<https://igc-market.ru/shop/> (дата обращения: 12.10.2023)

Образцы обозначались на основе типа использованного материала, вида нагружения (растяжение P1, P2, трёхточечный изгиб, сжатие), направления нарезания образцов относительно угла нити наполнителя. Для изготовленных образцов использованы следующие обозначения типов материалов:

- У1 – углепластик с наполнителем 200P и связующим Инжект SL(B);
- У2 – углепластик с наполнителем 200T и связующим Инжект SL(B);
- У3 – углепластик с наполнителем ACM C300X и связующим Инжект SL(B).

Далее приведены примеры расшифровки обозначения некоторых образцов:

• образец У1<sub>P1</sub>-0-1: У1 – углепластик с наполнителем 200P; P1 – испытание на растяжение по стандарту ASTM D3039/D3039M; образец нарезан в направлении основы нити (0°);

• образец У3(Д)<sub>C</sub>-90-5: У3 – углепластик с наполнителем ACM C300X; Д – наличие технологического дефекта; с – испытание на сжатие; образец нарезан в направлении 90° к основе нити.

В исследовании выполнены статические испытания 65 образцов, из которых 22 испытания проведены на растяжение P1, 14 – на растяжение P2, 20 – на трёхточечный изгиб и 9 – на сжатие. Испытания на растяжение и изгиб проводились на универсальной испытательной машине Z050TE Allround-Line Table-Top Machine, а испытания на сжатие – на WDW-300E. Нагружение образца проводилось со скоростью 2 мм/мин в испытании на растяжение, и 5 мм/мин в испытании на трёхточечный изгиб и сжатие. Все испытания проводились при нормальной температуре.

На рис. 5 показан характер разрушения испытанных образцов для определения механических характеристик композитов, на рис. 6 – характер разрушения образцов при исследовании влияния отверстия на работоспособность композита.



а



б

Рис. 5. Характер разрушения образцов для определения механических характеристик композитов: а – при растяжении P1; б – при трёхточечном изгибе



а



б

Рис. 6. Характер разрушения образцов при исследовании влияния отверстия на работоспособность композита: а – при растяжении P2; б – при сжатии

### Определение механических характеристик композита на растяжение

Результаты испытаний по стандарту ASTM D3039/D3039M для определения механических (упругих и прочностных) характеристик композитных пластин при растяжении и оценки влияния производственных дефектов представлены в табл. 3. Результаты расчёта сходимости результатов испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 3. Результаты испытаний для определения механических характеристик композитных пластин при растяжении

№	Серия	Образец	$F_{max}$ , Н	$\sigma_B$ , МПа	$\epsilon$ , %	$E$ , МПа	$\mu$
1	У1 <sub>Р1</sub>	У1 <sub>Р1</sub> -0-1	30600	658,37	2,5	53900	0,11
		У1 <sub>Р1</sub> -0-2	28400	632,33	2,3	56400	0,09
		У1 <sub>Р1</sub> -0-3	30700	651,96	3,0	54100	0,09
		У1 <sub>Р1</sub> -0-4	25500	579,95	2,1	55500	0,09
		У1 <sub>Р1</sub> -90-1	27200	595,06	2,0	53100	0,11
		У1 <sub>Р1</sub> -90-2	25800	554,24	2,0	53400	0,09
		У1 <sub>Р1</sub> -90-3	25500	549,65	2,0	53400	0,08
		У1 <sub>Р1</sub> -90-4	26000	561,88	1,9	52200	0,09
2	У2 <sub>Р1</sub>	У2 <sub>Р1</sub> -0-1	27700	643,93	2,9	58600	0,09
		У2 <sub>Р1</sub> -0-2	33100	768,63	3,0	56700	0,07
		У2 <sub>Р1</sub> -0-3	29900	722,27	2,7	55600	0,08
		У2 <sub>Р1</sub> -90-1	25500	585,14	2,5	57100	0,10
		У2 <sub>Р1</sub> -90-2	27800	655,69	3,1	56900	0,07
		У2 <sub>Р1</sub> -90-3	33100	748,18	2,7	58600	0,08
3	У3(Д) <sub>Р1</sub>	У3(Д) <sub>Р1</sub> -0-1	8240	112,40	9,3	8310	1,02
		У3(Д) <sub>Р1</sub> -0-2	6480	94,66	5,8	8160	1,02
		У3(Д) <sub>Р1</sub> -0-3	10600	150,08	15,1	9380	0,95
		У3(Д) <sub>Р1</sub> -0-4	10700	157,17	12,9	9460	0,96
		У3(Д) <sub>Р1</sub> -90-1	7710	101,97	20,3	5600	0,81
		У3(Д) <sub>Р1</sub> -90-2	9150	128,50	15,5	9310	1,38
		У3(Д) <sub>Р1</sub> -90-3	9590	129,41	20,3	7230	1,01
		У3(Д) <sub>Р1</sub> -90-4	6890	102,79	18,4	6360	0,94

Таблица 4. Коэффициенты вариации CV для серий образцов

№	Серия	Подсерия	CV, %				
			$F_{max}$	$\sigma_B$	$\epsilon$	$E$	$\mu$
1	У1 <sub>Р1</sub>	У1 <sub>Р1</sub> -0	8,48	5,64	16,67	2,16	10,52
		У1 <sub>Р1</sub> -90	2,85	3,63	2,53	1,07	13,60
2	У2 <sub>Р1</sub>	У2 <sub>Р1</sub> -0	9	8,86	5,33	2,66	12,5
		У2 <sub>Р1</sub> -90	13,53	12,33	11,04	1,61	18,33
3	У3(Д) <sub>Р1</sub>	У3(Д) <sub>Р1</sub> -0	22,56	23,30	37,94	7,80	3,82
		У3(Д) <sub>Р1</sub> -90	15,05	13,27	12,18	22,48	23,62

Анализ результатов показал, что образцы серии  $У2_{р1}$  из ткани 200Т (саржевого переплетения) продемонстрировали большие по сравнению с образцами серии  $У1_{р1}$  средние значения прочностных характеристик вдоль нитей основы:  $\bar{F}_{\max(0)} = 30233 \text{ Н}$ ,  $\bar{\sigma}_{B(0)} = 711,6 \text{ МПа}$ . В то же время образцы серии  $У1$  в целом продемонстрировали меньшие коэффициенты вариации.

На рис. 7 – 9 представлены графики зависимости усилий от абсолютной деформации  $\Delta L$  по сериям образцов.

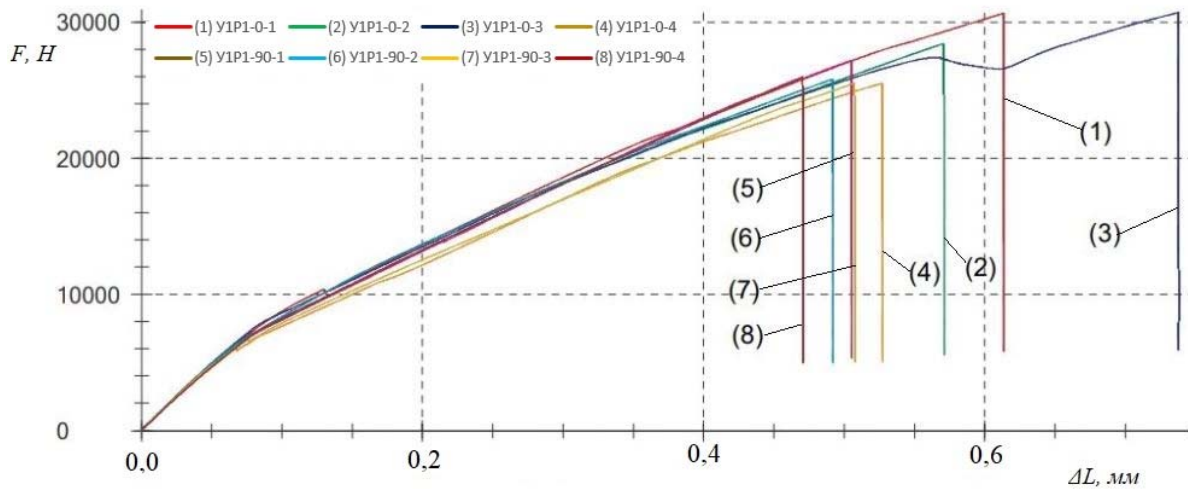


Рис. 7. График зависимости усилий от абсолютной деформации серии образцов  $У1_{р1}$

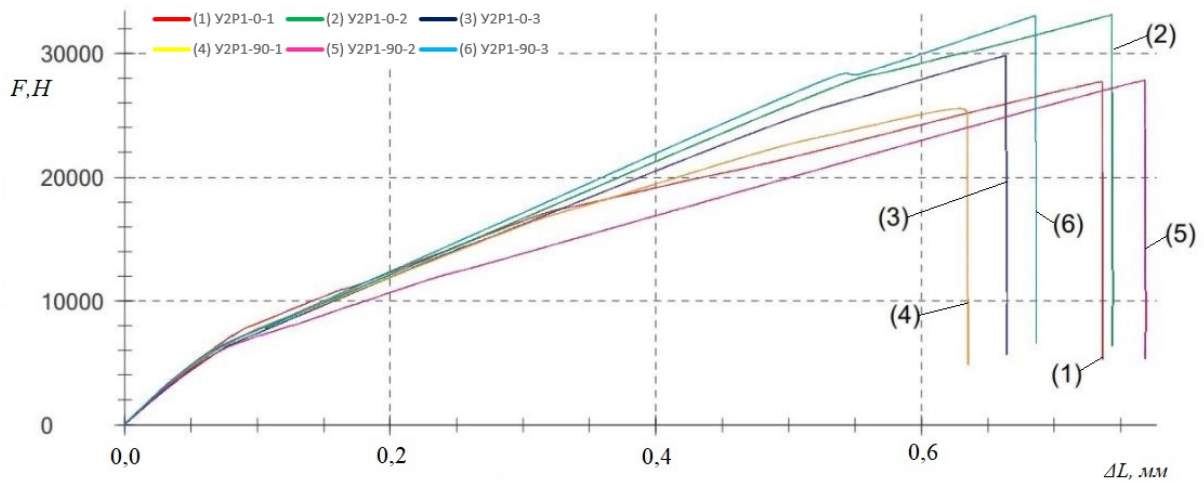


Рис. 8. График зависимости усилий от абсолютной деформации серии образцов  $У2_{р1}$



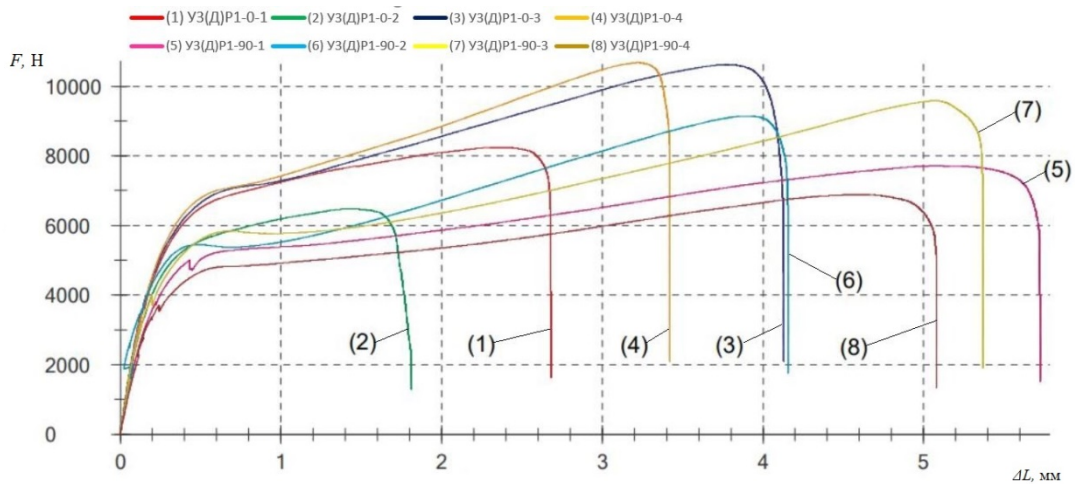


Рис. 9. График зависимости усилий от абсолютной деформации серии образцов УЗ(Д)р1

### Определение механических характеристик композита на трёхточечный изгиб

В процессе испытания на трёхточечный изгиб осуществлялось определение механических характеристик композитного изделия и выполнена оценка влияния производственных дефектов на данные характеристики. Образцы испытаний изготовлены из угле-летки 200Т и связующего «Инжект SL(B)». Результаты испытаний представлены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты испытаний на трёхточечный изгиб

№	Образец	$\sigma_B^H$ , МПа	$\varepsilon^H$ , %	$E^H$ , МПа	№	Образец	$\sigma_B^H$ , МПа	$\varepsilon^H$ , %	$E^H$ , МПа
	CV, %					CV, %			
Образцы без дефектов формования									
1	У <sub>н</sub> -0-1	812	1,9	42200	1	У <sub>н</sub> -90-1	771	1,9	41900
2	У <sub>н</sub> -0-2	851	2,0	42700	2	У <sub>н</sub> -90-2	763	1,9	42800
3	У <sub>н</sub> -0-3	769	1,8	44100	3	У <sub>н</sub> -90-3	690	1,7	39400
4	У <sub>н</sub> -0-4	708	1,8	43500	4	У <sub>н</sub> -90-4	752	1,8	42000
5	У <sub>н</sub> -0-5	782	1,9	41400	5	У <sub>н</sub> -90-5	729	1,8	42700
6	$\bar{x}$	784,4	1,88	42780	6	$\bar{x}$	741	1,82	41760
7	CV	6,77	4,45	2,48	7	CV	4,40	4,60	3,30
Образцы с дефектом формования									
1	У(Д) <sub>н</sub> -0-1	647	2,1	31000	1	У(Д) <sub>н</sub> -90-1	605	2,0	27000
2	У(Д) <sub>н</sub> -0-2	625	2,1	28300	2	У(Д) <sub>н</sub> -90-2	598	2,1	26000
3	У(Д) <sub>н</sub> -0-3	659	2,1	29400	3	У(Д) <sub>н</sub> -90-3	636	2,0	30100
4	У(Д) <sub>н</sub> -0-4	673	2,2	31200	4	У(Д) <sub>н</sub> -90-4	613	2,1	29500
5	У(Д) <sub>н</sub> -0-5	630	2,1	28600	5	У(Д) <sub>н</sub> -90-5	619	2,0	28700
6	$\bar{x}$	646,8	2,12	29700	6	$\bar{x}$	614,2	2,04	28260
7	CV	3,08	2,11	4,52	7	CV	2,37	2,68	6,08

Анализ результатов испытаний, представленных в табл. 5, показал, что дефекты в композите при его формировании влияют на работоспособность изделия, ослабляя его удельные характеристики. Например, образцы без дефектов Уи-0 оказались на 20% прочнее образцов с дефектами У(Д)и-0. Средние значения их пределов прочности соотносятся следующим образом:  $\bar{\sigma}_{B[Уи-0]}^H = 1,2\bar{\sigma}_{B[У(Д)и-0]}^H$ .

Образцы без дефектов показали низкие значения коэффициентов вариации для модуля упругости композита, а образцы с технологическим дефектом – для прочностных характеристик ПКМ.

На рис. 10 и 11 представлены графики зависимости напряжений от абсолютной деформации образцов без дефектов и с дефектами. Как видно, образцы без дефектов более прочные и показали наименьшие деформации, подтверждая анализ результатов, представленных в табл. 5.

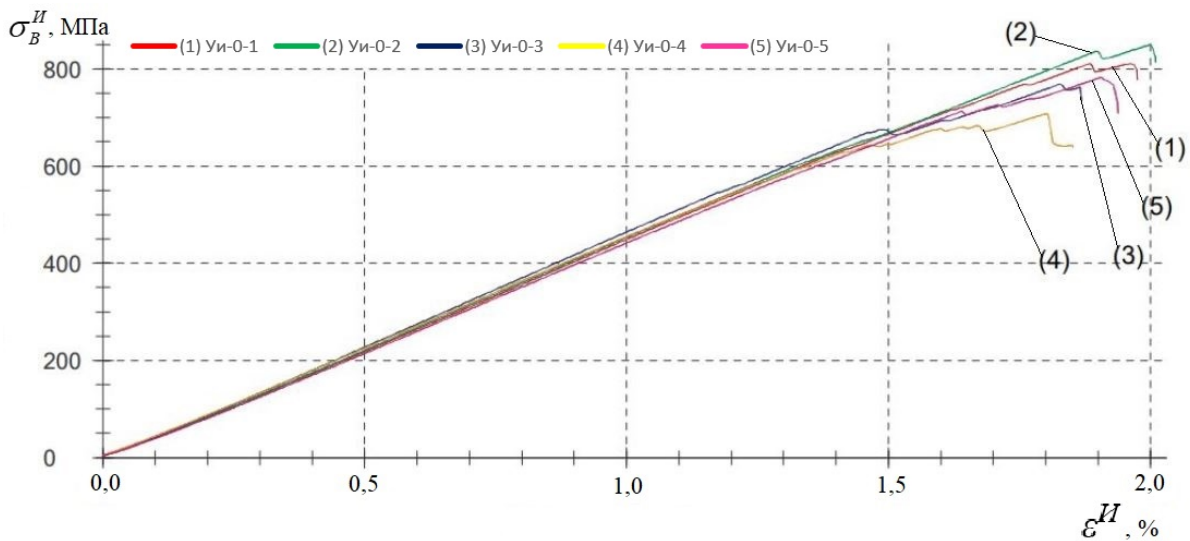


Рис. 10. График зависимости напряжений от абсолютной деформации образцов без дефектов

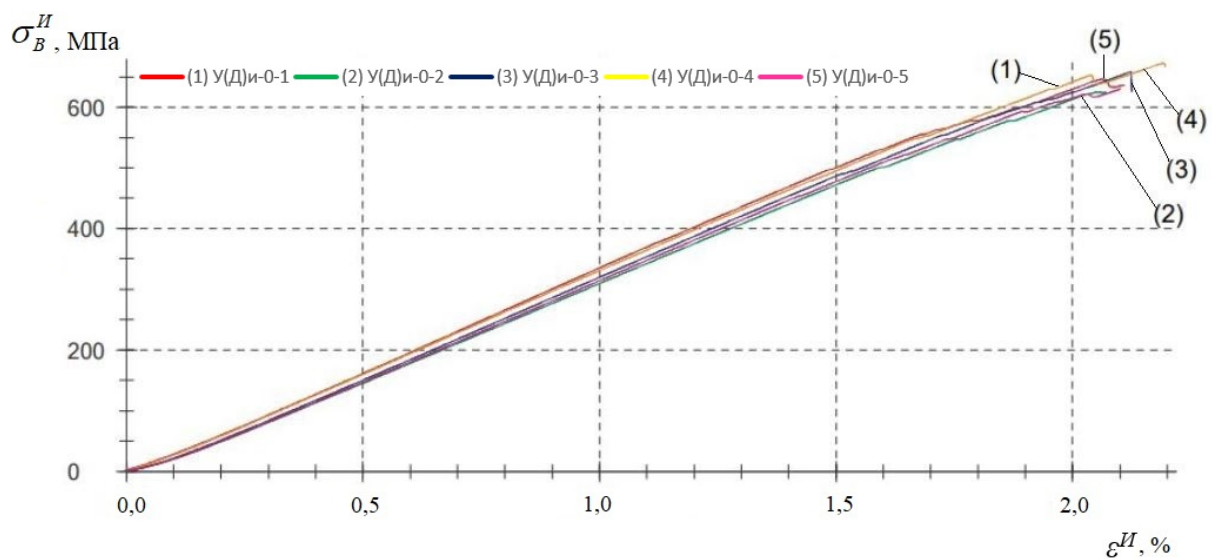


Рис. 11. График зависимости напряжений от абсолютной деформации образцов с дефектами

### Результаты испытаний на растяжение образцов с отверстиями

Результаты испытаний на растяжение по ГОСТ 33375-2015 для исследования влияния отверстия на механические характеристики композита представлены в табл. 6.

Таблица 6. Результаты исследования влияния отверстия на механические характеристики композита при растяжении

№	Образец	Отверстие $d$ , мм	$F_{max}$ , Н	$\sigma_B$ , МПа	№	Образец	Отверстие $d$ , мм	$F_{max}$ , Н	$\sigma_B$ , МПа
1	У2 <sub>Р2</sub> -0-1	0	55363	773,24	2	У2(Д) <sub>Р2</sub> -0-1	0	56568	555,02
	У2 <sub>Р2</sub> -0-2	6	24337	338,96		У2(Д) <sub>Р2</sub> -0-2	6	23795	239,48
	У2 <sub>Р2</sub> -0-3		25936	355,29		У2(Д) <sub>Р2</sub> -0-3		25861	250,98
	У2 <sub>Р2</sub> -0-4		24526	335,97		У2(Д) <sub>Р2</sub> -0-4		25498	247,46
3	У3(Д) <sub>Р2</sub> -0-1	0	20628	171,38	4	У3(Д) <sub>Р2</sub> -90-1	0	18672	151,70
	У3(Д) <sub>Р2</sub> -0-2	6	14291	114,84		У3(Д) <sub>Р2</sub> -90-2	6	13712	115,81
	У3(Д) <sub>Р2</sub> -0-3		16336	133,10		У3(Д) <sub>Р2</sub> -90-3		13477	108

Результаты испытаний, представленные в табл. 6, показали, что технологические отверстия в ПКМ оказали значительное влияние на прочностные характеристики изделий. Ослабление отверстием образцов У2<sub>Р2</sub>-0, У2(Д)<sub>Р2</sub>-0, У3(Д)<sub>Р2</sub>-0, У3(Д)<sub>Р2</sub>-90 достигло значений 56,55%; 56,85%; 33% и 28,8%, соответственно. В то же время производственные дефекты в композите из ткани 200Т оказали существенно меньшее влияние на работоспособность композита – средняя разрушающая нагрузка  $F_{max}$  изделия У2(Д) незначительно отличается от аналогичного изделия У2 ( $F_{maxУ2(Д)Р2-0-1} = 1,02F_{maxУ2Р2-0-1}$ ).

### Результаты испытаний на сжатие образцов с отверстиями

Результаты испытаний на сжатие по стандарту ASTM D7137/D7137M-12, представленные в табл. 7, показали, что наличие вырезов в пластинах У3(Д)<sub>С</sub> привели к незначительному уменьшению значений пределов прочности образцов. Так, для образцов серии У3(Д)<sub>С</sub>-0 средние значения  $\sigma_B^{СЖ}$  снизились на 4,46%, а для образцов серии У3(Д)<sub>С</sub>-90 снизились на 10,11%. Для образцов серии У1<sub>С</sub>-90 разрушение происходило при потере устойчивости пластины за пределами зоны отверстия (рис. 12).

Таблица 7. Результаты исследования влияния отверстия на механические характеристики композита при сжатии

№	Серия	Образец	$b$ , мм	$h$ , мм	Отверстие $d$ , мм	$P_{max}^{СЖ}$ , Н	$\sigma_B^{СЖ}$ , МПа
1	У1 <sub>С</sub> -90	У1 <sub>С</sub> -90-1	100,75	2,30	0	21726	93,76
		У1 <sub>С</sub> -90-2	101,20	2,30	12	30318	130,25
		У1 <sub>С</sub> -90-3	100,40	2,30	12	26618	115,27
2	У3(Д) <sub>С</sub> -0	У3(Д) <sub>С</sub> -0-1	100,70	3,50	0	22340	63,38
		У3(Д) <sub>С</sub> -0-2	99,25	3,50	12	21088	60,55
		У3(Д) <sub>С</sub> -0-3	100,50	3,50	12	22204	63,12
3	У3(Д) <sub>С</sub> -90	У3(Д) <sub>С</sub> -90-1	100,00	3,50	0	30602	87,43
		У3(Д) <sub>С</sub> -90-2	101,15	3,50	12	28018	79,14
		У3(Д) <sub>С</sub> -90-3	99,75	3,50	12	27438	78,59



Рис. 12. Разрушение образца за пределами зоны отверстия

### Заключение

Оценивая результаты исследования, следует отметить, что разработанная методика исследования механических характеристик композиционного материала содержит статические испытания образцов на одноосное растяжение, сжатие и трёхточечный изгиб, учитывает наличие в конструкциях технологических отверстий и производственных дефектов.

По результатам проведённых испытаний сделан вывод, что технологические отверстия в ПКМ оказывают значительное влияние на прочностные характеристики изделий.

Дефекты формования оказывают большее влияние на прочность композитных пластин из биаксиальной ткани с направлением волокон  $-45/+45$  по сравнению с композитами с направлением волокон  $0/90$ .

Визуальный контроль испытаний изделий без дефекта формования выявил мгновенный характер разрушения образцов, а при испытании на сжатие изделия УЗ(Д) с дефектом наблюдался прогрессивный характер разрушения.

Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, могут быть использованы для настройки и верификации цифровых моделей изделий из ПКМ.

### Библиографический список

1. Фейгенбаум Ю.М., Бутушин С.В., Божевалов Д.Г., Соколов Ю.С. Композиционные материалы и история их внедрения в авиационные конструкции // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2015. № 7 (318). С. 24-37.
2. Адхамов А., Нумонов А. Перспективы применения ПКМ в автомобильной промышленности // техНика. 2021. № 1 (5). С. 8-13. DOI: 10.24411/2181-0753/2021-100002
3. Кудрицкий В.Г. Композиционные материалы для узлов трения космического назначения // Полимерные материалы и технологии. 2022. Т. 8, № 3. С. 82-88. DOI: 10.32864/polymmattech-2022-8-3-82-88
4. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72, № 1. С. 3-12.
5. Павлов С.И. CAE-технологии в 2014 году: обзор достижений и анализ рынка // CAD/CAM/CAE Observer. 2015. № 4 (96). С. 25-35.
6. Сидорина А.И., Сафронов А.М., Куцевич К.Е., Клименко О.Н. Углеродные ткани для изделий авиационной техники // Труды ВИАМ. 2020. № 12 (94). С. 47-58. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58

7. Асси А.Л. Экспериментальное исследование влияния выреза на прочность композитной пластины, армированной биаксиальной углетканью // Сборник трудов XXIV Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2023» (15-17 ноября 2023 г., Пермь). Пермь: Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2023. С. 26-27.

8. Асси А.Л., Болдырев А.В. Разработка методики экспериментального исследования прочности слоистого углепластика с отверстием при растяжении // Сборник трудов Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием «XVII Королёвские чтения» (3-5 октября 2023 г., Самара). Т. 1. Самара: Издательство Самарского университета, 2023. С. 144-145.

9. Комаров В.А., Кишов Е.А., Чарквиани Р.В., Павлов А.А. Расчётно-экспериментальный анализ прочности изделий из эпоксидного тканевого углепластика // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2015. Т. 14, № 2. С. 106-112. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-2-106-112

10. Mr. Sanxthosh Kumar. M, Dr. S.G. Gopala Krishna, Dr. Rajanna. S. Study on effect of thickness and fibre orientation on a tensile and flexural properties of a hybrid composite // Journal of Engineering Research and Applications. 2014. V. 4, Iss. 8. P. 56-66.

11. Воробей В.В., Маркин В.Б. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций. Барнаул: ООО «МЦ ЭОР», 2015. 310 с.

12. Carello M., Amirth N., Airale A.G., Monti M., Romeo A. Building block approach' for structural analysis of thermoplastic composite components for automotive applications // Applied Composite Materials. 2017. V. 24. P. 1309-1320. DOI: 10.1007/s10443-017-9592-x

13. Комаров В.А., Павлов А.А., Павлова С.А. Экспериментально-аналитическое определение упругих характеристик слоистого тканевого композита // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 2. С. 65-79. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-2-65-79

14. ГОСТ 25.601-80. Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах. М.: Издательство стандартов, 1980. 14 с.

15. ASTM D3039/D3039M. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. ASTM International, 2017. 13 p.

16. ГОСТ Р 56810-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на изгиб плоских образцов. М.: Стандартинформ, 2016. 19 с.

17. ГОСТ 33375-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение образцов с открытым отверстием. М.: Стандартинформ, 2016. 7 с.

18. ASTM D7137/D7137M-12. Standard test method for compressive residual strength properties of damaged polymer matrix composite plates. ASTM International, 2012. 16 p.

19. ГОСТ 33495-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на сжатие после удара. М.: Стандартинформ, 2015. 19 с.

20. ASTM D790-17. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. ASTM International, 2017. 12 p.

21. Митрайкин В.И., Беззаметнов О.Н. Прочность многослойных пластин с ударными повреждениями // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. 2022. Т. 164, № 2-3. С. 206-220. DOI: 10.26907/2541-7746.2022.2-3.206-220

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE EFFECT OF MANUFACTURING HOLES AND DEFECTS ON THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF LAMINATED POLYMER COMPOSITE

© 2024

**A. L. Assi** Postgraduate Student of the Department of Aircraft Construction and Design;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[ttukasi@mail.ru](mailto:ttukasi@mail.ru)

**A. V. Boldyrev** Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, Head of the Department  
of Aircraft Construction and Design;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[boldirev.av@ssau.ru](mailto:boldirev.av@ssau.ru)

**A. A. Pavlov** Candidate of Science (Engineering), Assistant of the Department  
of Aircraft Construction and Design, Engineer of the Research and Educational  
Center for Aircraft Construction;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[kipla@ssau.ru](mailto:kipla@ssau.ru)

The paper presents a developed methodology for experimental research of the mechanical characteristics of a laminated polymer composite, taking into account manufacturing holes and defects. The results of experimental determination of mechanical characteristics are presented, the influence of the filler material, the type of fabric fiber weave, holes and manufacturing defects on the mechanical characteristics of laminated carbon fiber reinforced plastic are analyzed. The test specimens were made from carbon fiber 200T, 200P, ACM C300X and binder "Inject SL(B)". Static tests of specimens for uniaxial tension, compression and three-point bending were performed.

*Experimental research; laminated carbon fiber reinforced plastic; static tests; effect of hole; type of fiber; manufacturing defect; variation coefficient*

---

*Citation:* Assi A.L., Boldyrev A.V., Pavlov A.A. Experimental research of the effect of manufacturing holes and defects on the mechanical characteristics of laminated polymer composite. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 2. P. 74-88. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-2-74-88

### References

1. Feygenbaum Yu.M., Butushin S.V., Bozhevalov D.G., Sokolov Yu.S. Composite materials and history their introduction in aircraft structures. *Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation*. 2015. No. 7 (318). P. 24-37. (In Russ.)
2. Adkhamov A., Numonov A. Prospects for application of PCM in the automotive industry. *tecNika*. 2021. No. 1 (5). P. 8-13. (In Russ.). DOI: 10.24411/2181-0753/2021-100002
3. Kudritsky V.G. Composite materials for space friction units. *Polymer Materials and Technologies*. 2022. V. 8, no. 3. P. 82-88. (In Russ.). DOI: 10.32864/polymmattech-2022-8-3-82-88
4. Kablov E.N. Aviation materials science: achievements and prospects. *Vestnik Rossiyskoy Akademii Nauk*. 2002. V. 72, no. 1. P. 3-12. (In Russ.)
5. Pavlov S.I. CAE technologies in 2014: review of achievements and market analysis. *CAD/CAM/CAE Observer*. 2015. No. 4 (96). P. 25-35. (In Russ.)
6. Sidorina A.I., Safronov A.M., Kutsevich K.E., Klimenko O.N. Carbon fabrics for aircraft products. *Proceedings of VIAM*. 2020. No. 12 (94). P. 47-58. (In Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58
7. Assi A.L. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya vyreza na prochnost' kompozitnoy plastiny, armirovannoy biaksial'noy ugletkan'yu. *Sbornik trudov XXIV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aerokosmicheskaya Tekhnika, Vysokie*

*Tekhnologii i Innovatsii – 2023»* (November, 15-17, 2023, Perm). Perm: Perm National Research Polytechnic University Publ., 2023. P. 26-27. (In Russ.)

8. Assi A.L., Boldyrev A.V. Razrabotka metodiki eksperimental'nogo issledovaniya prochnosti sloistogo ugleplastika s otverstiem pri rastyazhenii. *Sbornik trudov Vserossiyskoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «XVII Korolevskie Chteniya»* (October, 3-5, 2023, Samara). V. 1. Samara: Samara University Publ., 2023. P. 144-145. (In Russ.)

9. Komarov V.A., Kishov E.A., Charkviani R.V., Pavlov A.A. Numerical and experimental study of the strength of fabric carbon-epoxy composite structures. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2015. V. 14, no. 2. P. 106-112. (In Russ.). DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-2-106-112

10. Mr. Sanxthosh Kumar. M, Dr. S.G. Gopala Krishna, Dr. Rajanna. S. Study on effect of thickness and fibre orientation on a tensile and flexural properties of a hybrid composite. *Journal of Engineering Research and Applications*. 2014. V. 4, Iss. 8. P. 56-66.

11. Vorobey V.V., Markin V.B. *Kontrol' kachestva izgotovleniya i tekhnologiya remonta kompozitnykh konstruksiy* [Manufacturing quality control and repair technology for composite structures]. Barnaul: OOO «MTs EOR» Publ., 2015. 310 p.

12. Carello M., Amirth N., Airale A.G., Monti M., Romeo A. Building block approach' for structural analysis of thermoplastic composite components for automotive applications. *Applied Composite Materials*. 2017. V. 24. P. 1309-1320. DOI: 10.1007/s10443-017-9592-x

13. Komarov V.A., Pavlov A.A., Pavlova S.A. Experimental and analytical determination of the elastic characteristics of layered woven composites. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022. V. 21, no. 2. P. 65-79. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-2-65-79

14. GOST 25.601-80. Design calculation and strength testings. Methods of mechanical testing of polymeric composite materials test for tensile properties on plane specimens at normal, elevated and low temperatures. Moscow: Izdatel'stvo Standartov, 1980. 14 p. (In Russ.)

15. ASTM D3039/D3039M. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. ASTM International, 2017. 13 p.

16. GOST P 56810-2015. Polymer composites. Test method for flexural flat samples. Moscow: Standartinform Publ., 2016. 19 p. (In Russ.)

17. GOST 33375-2015. Polymer composites. Test method for open-hole tension testing of specimens. Moscow: Standartinform Publ., 2016. 7 p. (In Russ.)

18. ASTM D7137/D7137M-12. Standard test method for compressive residual strength properties of damaged polymer matrix composite plates. ASTM International, 2012. 16 p.

19. GOST 33495-2015. Polymer composites. Test method for compression after impact. Moscow: Standartinform Publ., 2015. 19 p. (In Russ.)

20. ASTM D790-17. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. ASTM International, 2017. 12 p.

21. Mitryaykin V.I., Bezzametnov O.N. Strength of multilayered plates with impact damage. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*. 2022. V. 164, no. 2-3. P. 206-220. (In Russ.). DOI: 10.26907/2541-7746.2022.2-3.206-220