



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ (ВВФ) НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ УГЛЕПЛАСТИКОВ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Богомолова А.Д., Сеницын А.В.

*ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения  
им. П.И. Баранова», г. Москва, Россия*

### АННОТАЦИЯ

В течение последних десятилетий интерес к использованию композиционных материалов в конструкции воздушного судна (ВС) значительно возрос. Современные углепластики авиационного назначения по своим удельным прочностным свойствам могут конкурировать с алюминиевыми и титановыми сплавами. Тем не менее, использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) применительно к деталям ВС является сложной технической задачей, которая напрямую связана с особенностями ПКМ. Композиционные материалы (КМ) – многокомпонентные материалы, которые представляют собой пластичную основу (матрица), армированную наполнителями, обладающими высокой прочностью и жесткостью. Сочетание различных веществ приводит к созданию совершенно нового материала, свойства которого количественно и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих.

В работе рассмотрены результаты экспериментального определения механических характеристик (предела прочности при изгибе и межслоевом сдвиге после воздействия внешних факторов) и сопоставления полученных результатов с исходным состоянием (до воздействия внешних факторов) углепластиков авиационного назначения. При работе двигателя, вследствие воздействия повышенных температур, происходит полное или частичное испарение всех жидкостей, попавших внутрь конструкции. Поэтому, длительное влияние агрессивных эксплуатационных жидкостей на изделие, возможно лишь при продолжительной стоянке самолета на земле.

Поскольку результаты испытаний показывают достаточно большой разброс величин, исходя из значений коэффициента вариации, был проведен дисперсионный анализ данных. Методы дисперсионного анализа позволяют оценить величину влияния конкретных факторов на исследуемое значение прочности.

Основная идея однофакторного дисперсионного анализа заключается в сравнении дисперсии исследуемого значения прочности, вызванной действием внешнего фактора, с дисперсией ошибок измерения этого значения прочности. Если различие между ними значимо, то фактор оказывает существенное влияние на исследуемую прочность материала.

Было проведено исследование и анализ среднего значения прочности и однофакторного дисперсионного анализа разброса результатов испытаний на межслоевой сдвиг и изгиб.

**Ключевые слова:** композиционные материалы; прочность; межслоевой сдвиг изгиб; влияние воздействия внешних факторов; эксплуатационные жидкости; повышенная температура эксплуатации; однофакторный дисперсионный анализ

## INVESTIGATION OF THE IMPACT OF OPERATIONAL AND CLIMATIC EXTERNAL INFLUENCING FACTORS ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF CARBON FIBER PLASTICS FOR AVIATION PURPOSES

Bogomolova A.D., Sinitcyn A.V.

*Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russia*

### ABSTRACT

Over the past decades, interest in the use of composite materials in aircraft design has increased significantly. Modern carbon fiber plastics for aviation purposes can compete with aluminum and titanium alloys in terms of their specific strength properties. Nevertheless, the use of polymer composite materials (PCM) in relation to aircraft parts is a complex technical task that is directly related to the features of the PCM. Composite materials (CM) are multicomponent materials that represent a plastic base (matrix) reinforced with fillers with high strength and rigidity. The combination of different substances leads to the creation of a completely new material, the properties of which differ quantitatively and qualitatively from the properties of each of its components.

The paper considers the results of experimental determination of mechanical characteristics (bending strength and interlayer shear after exposure to external factors) and comparison of the results obtained with the initial state (before exposure to external factors) of carbon fiber plastics for aviation purposes. During engine operation, due to exposure to elevated temperatures, complete or partial evaporation of all liquids trapped inside the structure occurs. Therefore, the long-term effect of aggressive operating fluids on the product is possible only when the aircraft is parked on the ground for a long time.

Since the test results show a fairly large range of values, based on the values of the coefficient of variation, a variance analysis of the data was carried out. The methods of dispersion analysis allow us to estimate the magnitude of the influence of specific factors on the strength value under study.

The main idea of one-factor analysis of variance is to compare the variance of the strength value under study, caused by the action of an external factor, with the variance of errors in measuring this strength value. If the difference between them is significant, then the factor has a significant effect on the studied strength of the material.

A study and analysis of the average strength value and a one-factor dispersion analysis of the spread of the results of interlayer shear and bending tests were carried out.

**Keywords:** composite materials; strength, interlaminar shear bending; influence of external factors; operating fluids; elevated operating temperature; one-factor variance analysis

### ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) в настоящее время широко используются в авиационной промышленности, в частности для элементов силовой установки, ПКМ используется для таких деталей как рабочая лопатка и корпус вентилятора.

Детали авиационного двигателя при эксплуатации могут подвергаться воздействию различных климатических факторов: повышенная влажность, повышенные и пониженные температуры и др. Под влиянием различных внешних факторов происходит изменение механических характеристик материалов. Этот факт необходимо учитывать при проектировании изделий, поэтому

при проведении квалификации ПКМ для элементов двигательной установки особое внимание уделяется оценке стойкости к внешним воздействующим факторам. Необходимо проведение механических испытаний образцов, предварительно подверженных воздействиям, имитирующих возможные условия эксплуатации. В рамках данной работы были проведены исследования по оценке влияния воздействий различных климатических условий и эксплуатационных жидкостей на механические характеристики ПКМ.

В работе рассмотрены результаты экспериментального определения механических характеристик углепластиков авиационного назначения с учетом различных внешних воздействующих факторов (ВВФ). Исследование влияния ВВФ проводилось путем определения механических характеристик углепластика: предела прочности при изгибе по ГОСТ 56810-2015 [1] и межслоевом сдвиге по ГОСТ 57745-2017[2] после воздействия ВВФ и сопоставления полученных результатов с исходным состоянием (до воздействия внешних факторов). Влага, температура и эксплуатационные жидкости существенно влияют на адгезию матрицы и волокон, поэтому наиболее чувствительными являются именно межслоевые характеристики прочности.

## **1. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКИ**

### **1.1. Объекты исследования.**

Объектом исследования является углепластик авиационного назначения с условным обозначением У1 со схемой армирования  $[0;90]_n$ . Форма и размеры образцов были выбраны исходя из требований ГОСТ.

При проведении исследования стойкости ПКМ к ВВФ необходимо учитывать, следующие эксплуатационные факторы:

- температура окружающего воздуха от минус 60 до плюс 55°C во время стоянки самолета на земле;
- температура окружающего воздуха от минус 55 до плюс 120°C во время полета;
- относительная влажность воздуха до 100% при 35°C;
- влияние эксплуатационных жидкостей.

В рамках данного исследования по каждому из типов испытаний было изучено 4 партии образцов по 5 шт. после экспонирования в эксплуатационных жидкостях и 4 партий образцов по 5 шт., экспонированных при различных условиях ВВФ.

### **1.2. Методики механических испытаний.**

Исследования проводили в аккредитованной лаборатории ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова». Испытания на межслоевой сдвиг были проведены согласно ГОСТ 57745-2017 на образцах размерами: длиной  $L = 24$  мм, шириной  $b = 8$  мм, толщиной  $h = 4$  мм. К образцу, лежащему на двух опорах, прикладывается поперечная нагрузка. По результатам испытаний определяют предел прочности при межслоевом сдвиге (рис.1).

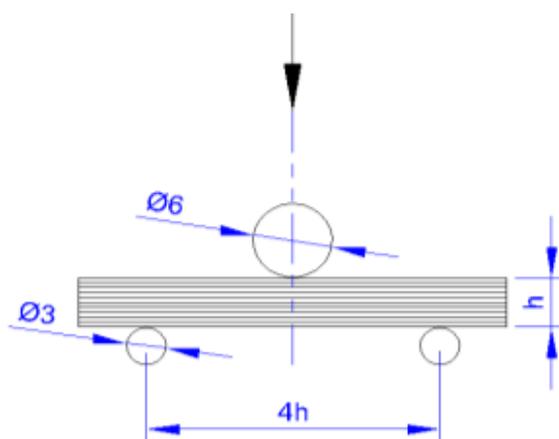


Рис.1. Метод «короткой балки» для определения прочности при межслоевом сдвиге.

Для испытаний на изгиб были использованы образцы размерами: длина  $L = 154$  мм, ширина  $b = 13$  мм, толщина  $h = 4$  мм. Расстояние между опорами составляло  $32h$ . По результатам испытаний определены предел прочности и модуль упругости при изгибе (рис.2).

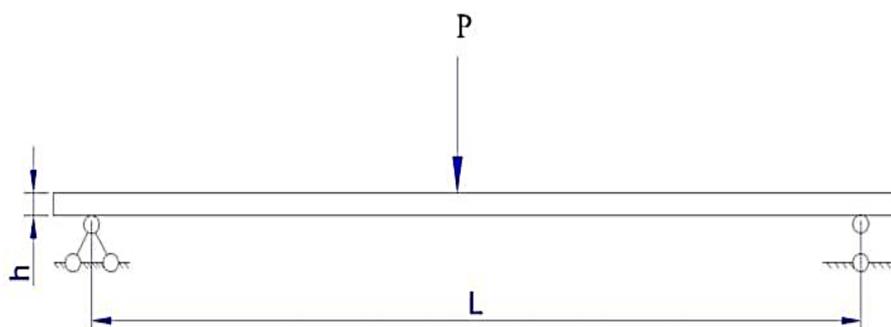


Рис.2. Метод испытания на трёхточечный изгиб.

Были проведены испытания образцов на межслоевой сдвиг и изгиб в исходном состоянии (без воздействия факторов) и после воздействия внешних факторов.

### 1.3. Методики испытаний ВВФ.

В качестве ВВФ были выбраны различные температурные режимы (Таблица 1) и использован ряд эксплуатационных жидкостей (см. Таблица 2), в которых проходила предварительная экспозиция образцов.

Таблица 1.

Температурные режимы ВВФ.

Тип ВВФ	Время выдержки образцов	Режимы экспонирования	ГОСТ
Тепловое старение	100 ч	$T = 120$ °С	ГОСТ 9.707-81 [3]
Повышенная температура эксплуатации	100 ч	$T = 150$ °С	ГОСТ 9.707-81
Ускоренное старение	30 сут	$T = 60$ °С, влажность 85%	ГОСТ 9.707-81

Умеренный климат	19 суток	$T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , влажность 93%	ГОСТ Р 51369-99 [4]
------------------	----------	---	---------------------

В рамках данного исследования было выбрано три эксплуатационных фактора (тепловое старение, повышенная температура эксплуатации, ускоренное старение) и три климатических (умеренный климат).

Таблица 2.

Эксплуатационные жидкости.

Наименование эксплуатационной жидкости*	ГОСТ
Масло ИПМ-10	ГОСТ 12020-2018
Топливо ТС-1	ГОСТ 12020-2018
Гидравлическая жидкость Skydrol LD-4	ГОСТ 12020-2018
Вода дистиллированная и гидравлическая жидкость Skydrol LD-4, SAE AS 1241 В в объемном соотношении 1 к 1	ГОСТ Р 58144-2018 [5] ГОСТ 12020-2018

\*Время выдержки образцов в эксплуатационных жидкостях составляло 14 суток, что существенно повлияло на прочностные характеристики материалов.

Стойкость к воздействию химических сред определяли в соответствии с ГОСТ 12020-2018. Сущность метода заключается в определении изменения прочностных характеристик образцов ПКМ после выдержки в различных эксплуатационных жидкостях.

В Таблице 3 представлены средние значения прочности образцов при изгибе и межслоевом сдвиге в исходном состоянии (без воздействия ВВФ).

Таблица 3.

Значение прочности материала У1 в исходном состоянии.

Прочность межслоевом сдвиге, МПа	Прочность при изгибе, МПа	Модуль упругости, ГПа
78,1	1194,8	77,19

## 2. ОСОБЕННОСТЬ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЧНОСТЬ ПКМ

Рассмотрим чувствительность механических характеристик ПКМ к климатическим воздействиям. В следующих пунктах представлены обобщенные результаты сохраняемости некоторых механических характеристик ПКМ.

### 2.1. Изучение влияния эксплуатационных жидкостей на прочностные свойства и массу образцов из ПКМ.

Предварительно были проведены испытания на образцах в исходном состоянии с целью определения влияния эксплуатационных жидкостей на изменение значения прочности материала. В Таблице 4 представлены средние значения прочности испытаний образцов, изготовленных из углепластика У1.

Таблица 4.  
Влияние агрессивных жидкостей на механические показатели прочности углепластика У1.

Наименование эксплуатационной жидкости	Прирост массы, %	Прочность межслоевом сдвиге (после ВВФ), МПа	Прочность при изгибе (после ВВФ), МПа	Модуль упругости (после ВВФ), ГПа
Масло ИПМ-10	0,18	77,23	1262,11	77,19
Топливо ТС-1	0,15	78,2	1330,95	80,15
Гидравлическая жидкость Skydrol LD-4	0,057	69,76	1257,38	79,25
Вода дистиллированная и гидравлическая жидкость Skydrol LD-4	0,15	79,88	1212,99	71,61

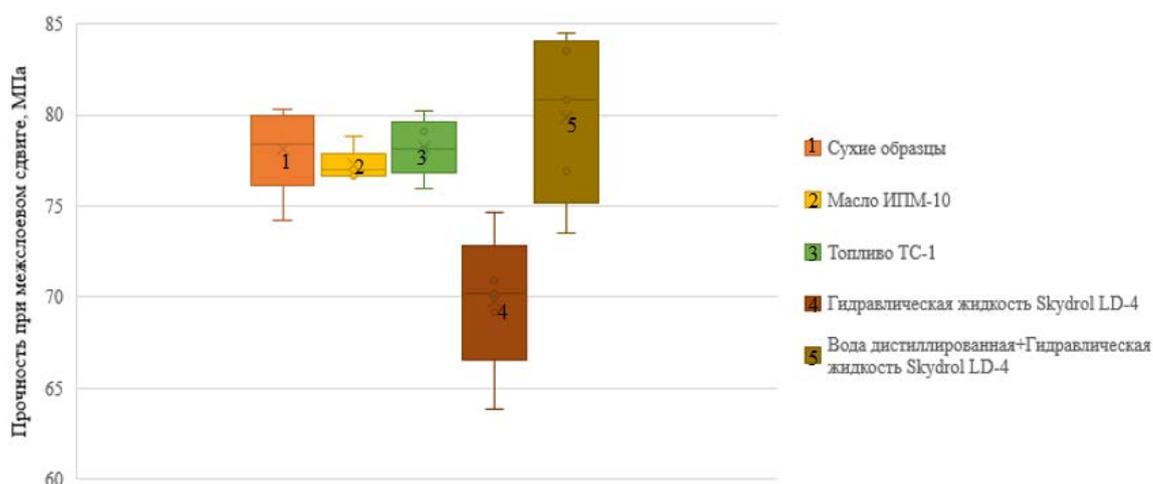


Рис.3. Влияние эксплуатационных жидкостей на прочность при межслоевом сдвиге углепластика У1.

Выдержка ПКМ в агрессивных жидкостях приводит к снижению значений прочностных характеристик. Наиболее существенное воздействие на прочность материала, исходя из осредненных значений при межслоевом сдвиге, оказала гидравлическая жидкость Skydrol, а наиболее широкий разброс значений наблюдается после воздействия смеси дистиллированной воды и Skydrol. После 2 недель воздействия жидкости при комнатной температуре показатель  $\tau$  углепластика при межслоевом сдвиге снижается в среднем на 11-13%. При этом больший разброс значений прочности при изгибе наблюдался у образцов, экспонирование которых проходило в Топливе ТС-1 (см. рис.4). Наиболее существенно упало значение модуля упругости (на 7,23%) при экспонировании образцов в смеси дистиллированной воды и гидравлической жидкости Skydrol.

Для объективных заключений о стойкости ПКМ к воздействию агрессивных жидкостей необходимо исследовать кинетику сорбции жидкостей при разных температурах и проводить измерение показателей массы и прочности после достижения сорбционного равновесия (равновесного влагосостояния материала), что позволит оценить скорость поглощения жидкости данным материалом [6]. Пока недостаточно изучено влияние этих жидких сред на механические показатели ПКМ при низких и повышенных температурах. Можно ожидать, что

при приближении температуры измерений к температуре стеклования полимерных матриц действие эксплуатационных жидкостей окажется более значительным, чем при комнатной температуре [7].

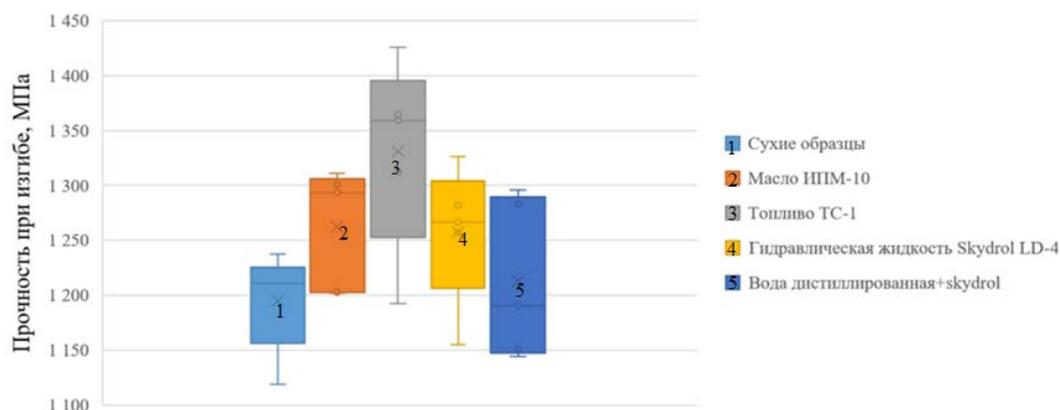


Рис.4. Влияние эксплуатационных жидкостей на прочность при изгибе углепластика У1.

## 2.2. Статистический анализ данных.

После проведения испытаний на изгиб и межслоевой сдвиг получены значения прочности ПКМ после воздействия на них различных ВВФ, результаты представлены в Таблице 5.

Таблица 5.

Значение прочности материала У1 после воздействия ВВФ.

Наименование ВВФ	Прочность при межслоевом сдвиге, МПа	Прочность при изгибе, МПа	Модуль упругости, ГПа
Тепловое старение	73,06	1249,35	77,74
Повышенная температура эксплуатации	75,43	1407,07	95,68
Ускоренное старение	80,26	1174,56	77,02
Умеренный климат	74,30	1342,38	86,74

Обязательными критериями химической стойкости являются изменение массы и линейных размеров образцов, но предполагается также определение разнообразных показателей свойств по методикам, изложенным в соответствующих стандартах. Для оценки влияния ВВФ на характеристики прочности использован коэффициент сохранения механических показателей [8]

$$kR = Rt/R0, \quad (1)$$

где,  $Rt$  – предел прочности при межслоевом сдвиге, изгибе и модуль упругости при изгибе ( $\sigma_b, E_b$ ) после воздействия ВВФ,  $R0$  – предел прочности при межслоевом сдвиге, изгибе и модуль упругости при изгибе ( $\sigma_b, E_b$ ) до воздействия ВВФ.

Таблица 6.  
Исследование сохранения механических характеристик материала.

Наименование ВВФ	Показатель $K_R$		
	Напряжение при межслоевом сдвиге	Напряжение при изгибе	Модуль упругости
Тепловое старение	0,94	1,05	1,01
Повышенная температура эксплуатации	0,97	1,18	1,24
Ускоренное старение	1,03	0,98	1,00
Умеренный климат	0,95	1,12	1,12

Исследования показали, что экспонирование при режиме «Повышенная температура эксплуатации» (150°C) увеличивает значение модуля упругости на 24%, что объясняется эффектами доотверждения полимерной матрицы [9-11]. Также, исходя из средних значений прочности, можно предположить, что наиболее существенное влияние на прочностные характеристики оказывает режим теплового старения ( $T = 120^\circ\text{C}$ , выдержка 100 ч), но коэффициент вариации составляет 10%, что для выборки из 5 образцов является достаточно высоким значением. Для сравнения коэффициент вариации для образцов без ВВФ составляет 2%.

Поскольку результаты испытаний показывают достаточно большой разброс величин, исходя из значений коэффициента вариации, был проведен дисперсионный анализ данных [12]. Методы дисперсионного анализа позволяют оценить величину влияния конкретных факторов на исследуемое значение прочности. Основная идея однофакторного дисперсионного анализа заключается в сравнении дисперсии исследуемого значения прочности, вызванной действием внешнего фактора, с дисперсией ошибок измерения этого значения прочности. Если различие между ними значимо, то фактор оказывает существенное влияние на исследуемую прочность материала.

Для сравнения влияния ВВФ на результативный фактор необходим определенный статистический материал – каждому уровню фактора должна соответствовать определенная выборка значений результативного фактора. Первоначально происходит оценка статистической значимости исследуемых факторов на рассматриваемые характеристики прочности путём сравнения расчётного и критического значений критерия Фишера [12].

При расчете определяется сумма квадратов отклонений всех возможных значений фактора от их общего среднего значения

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (x_{ij} - \bar{X})^2, \quad (2)$$

где  $x_{ij}$  – значение прочности для каждого образца в выборке;  $\bar{X}$  – среднее значение прочности в выборке.

Далее определяется сумма квадратов отклонений средних значений по группам от общего среднего значения (3) и сумма квадратов внутри выборки (4)

$$S_1 = n \sum_{j=1}^p (\bar{x}_j - \bar{X})^2, \quad (3)$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (x_{ij} - \bar{x}_j)^2, \quad (4)$$

где  $\bar{x}_j$ ,  $\bar{X}$  – соответственно среднее значение выборки и общее среднее значение результативного фактора, определяемые по формулам

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij}}{n}, \quad \bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^p \bar{x}_j}{p}. \quad (5)$$

Для оценки влияния фактора общая сумма разложена на  $S_1$  и  $S_2$

$$S = S_1 + S_2. \quad (6)$$

Сумма  $S_1$  отражает влияние на результативный фактор, а сумма  $S_2$  – влияние погрешностей измерений.

Суммы квадратов  $S$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ , деленные на соответствующие числа степеней свободы, дают три несмещенные оценки дисперсии  $\sigma^2$  генеральной совокупности

$$s^2 = \frac{S}{N-1}, \quad (7)$$

$$s_1^2 = \frac{S_1}{p-1}, \quad (8)$$

$$s_0^2 = \frac{S_2}{p(n-1)} = \frac{S_2}{N-p}. \quad (9)$$

Число степеней свободы представлено как число независимых отклонений значений фактора от его среднего значения. Сумма  $S_1$  имеет  $m_1 = p - 1$  степень свободы, так как из  $p$  отклонений групповых средних от общей средней независимых будет  $(p-1)$ , а последнее отклонение выражается через все предыдущие. Сумма  $S_2$  имеет  $m_2 = p(n-1)$  степеней свободы.

Если факторная дисперсия  $s_1^2$  окажется меньше остаточной  $s_0^2$ , то фактор оказывает несущественное влияние на фактор  $X$ .

Проверка значимости оценок дисперсии выполняется с помощью  $F$  – критерия Фишера, расчетное значение которого определяется дисперсионным отношением

$$F = s_1^2 / s_0^2 \text{ при } s_1^2 > s_0^2. \quad (10)$$

Если расчетное значение критерия окажется меньше критического, то нет оснований считать, что рассматриваемый фактор влияет на изменчивость средних значений случайной величины [12]. Если  $F > F_{kp}$ , то на принятом уровне значимости делается вывод о существенном влиянии фактора, в данном случае, температуры или эксплуатационных жидкостей на характеристики прочности материала.

Критическое значение распределения Фишера определяется для заданного числа степеней свободы (количество образцов  $n = 5$ , количество ВВФ  $p = 5$ ) и уровня значимости  $\alpha = 0,05$  по формуле ФРАСПОБР  $(\alpha, m_1, m_2)$ .

После того как выполнена оценка влияния фактора на изменчивость средних значений случайной величины в целом и установлено, что фактор влияет на изменчивость средних значений, то переходят к подробному исследованию отдельных уровней фактора [12]. Для этого проводится оценка расхождения средних значений, полученных при наблюдениях по отдельным уровням фактора.

Для сравнения двух выборочных средних используют  $t$ -статистику [12]. Вычисляют общую дисперсию двух выборок и расчетное значение  $t$ -статистики по формулам

$$s^2 = \frac{m_1 s_1^2 + m_2 s_2^2}{m}, \quad (11)$$

$$t_{рас} = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) \sqrt{n_1 n_2 / (n_1 + n_2)}}{s}. \quad (12)$$

Критическое значение  $t_{кр}$ -статистики (распределения Стьюдента) с уровнем значимости  $\alpha$  определяется по специальным статистическим таблицам, либо с помощью функции excel СТЬЮДРАСПОБР, которая возвращает двустороннее обратное  $t$ -распределение Стьюдента. Число степеней свободы  $m = m_1 + m_2$ . Гипотеза о равенстве выборочных средних подтверждается, если  $|t_{рас}| \leq t_{кр}$ . Если  $|t_{рас}| > t_{кр}$ , то уровень фактора с большим средним значением оказывает существенное влияние на исследуемое значение прочности.

В Таблице 7 представлена сводка дисперсионного анализа влияния эксплуатационных жидкостей на прочность при межслоевом сдвиге углепластика У1.

Таблица 7.

Дисперсионный анализ влияния эксплуатационных жидкостей на прочность при межслоевом сдвиге углепластика авиационного назначения У1.

Однофакторный дисперсионный анализ					
ИТОГИ					$t_{кр} = 2,09$
Группы	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия	Значение $t$
Масло ИПМ-10	5,00	386,13	77,23	0,80	0,41
Топливо ТС-1	5,00	391,10	78,22	2,52	0,06
Гидравлическая жидкость Skydrol LD-4	5,00	348,82	69,76	15,21	<b>3,91</b>
Вода дистиллированная + Skydrol	5,00	425,89	85,18	4,94	0,83
Дисперсионный анализ					
Источник вариации	$SS$	$df$	$MS$	$F$	$F$ критическое
Между группами	597,79	4,00	149,45	25,69	2,87
Внутри групп	116,36	20,00	5,82		
Итого	714,15	24,00			

Обозначения:  $SS$  между группами –  $S_1$ ,  $SS$  внутри групп –  $S_2$ ,  $df$  между группами –  $m_1$ ,  $df$  внутри групп –  $m_2$ ,  $MS$  между группами –  $S_1^2$ ,  $MS$  внутри групп –  $S_0^2$ .

Значение  $F > F_{кр}$ , что говорит о существенном влиянии эксплуатационных жидкостей на прочность при изгибе образцов У1. Наибольшее значение  $t$ -статистики для прочности при испытании показала гидравлическая жидкость

Skydrol LD-4, что указывает на ее существенное влияние на падение механических характеристик материала при межслоевом сдвиге.

При анализе результатов испытаний на изгиб было определено наиболее существенное влияние на прочность топлива ТС-1 (см. Таблица 8).

Таблица 8.

Дисперсионный анализ влияния эксплуатационных жидкостей на прочность при изгибе углепластика авиационного назначения У1.

Однофакторный дисперсионный анализ					
ИТОГИ					$t_{кр} = 2,09$
Группы	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия	Значение $t$
Масло ИПМ-10	5,00	6310,54	1262,11	3018,72	1,44
Топливо ТС-1	5,00	6654,67	1330,93	7630,41	<b>2,91</b>
Гидравлическая жидкость Skydrol LD-4	5,00	6286,89	1257,38	3977,44	1,34
Вода дистиллированная + Skydrol	5,00	6064,96	1212,99	5227,31	0,39
Дисперсионный анализ					
Источник вариации	SS	df	MS	F	F критическое
Между группами	55769,07	4,00	13942,27	3,18	2,87
Внутри групп	87648,03	20,00	4382,40		
Итого	143417,10	24,00			

Для каждого типа ВВФ было определено расчетное значение  $t_{кр}$  и критическое значение критерия Фишера. По результатам расчета был выявлен фактор, который наиболее существенно сказывается на прочностных характеристиках материала в условиях малого объема выборки (см. Таблица 9).

Таблица 9.

Определение наиболее статистически значимых ВВФ.

	Расчетное значение $t$ -статистики				
	$t_{кр}$	Масло ИПМ-10	Топливо ТС-1	Гидравлическая жидкость Skydrol LD-4	Вода дистиллированная и гидравлическая жидкость Skydrol LD-4
Влияние эксплуатационных жидкостей на прочность углепластика У1 при изгибе	2,09	1,44	<b>2,91</b>	1,34	0,39
Влияние эксплуатационных жидкостей на прочность углепластика У1 при межслоевом сдвиге	2,09	0,41	0,06	<b>3,91</b>	0,83

		Умеренный климат	Ускоренное старение	Тепловое старение	Повышенная температура эксплуатации
Влияние температуры на прочность углепластика У1 при изгибе	2,09	1,43	0,20	0,53	2,06
Влияние температуры на прочность углепластика У1 при межслоевом сдвиге	2,09	1,12	0,64	1,49	0,79

Результаты расчетов показали, что температурные воздействия менее существенны для данного материала, чем эксплуатационные жидкости. То есть гипотеза о том, что из всех температурных ВВФ более существенно на прочности углепластика У1 сказывается режим теплового старения ( $T = 120^\circ\text{C}$ , выдержка 100 ч) не подтвердилась, более того исходя из результатов статистических расчетов температурные режимы, которые были рассмотрены в рамках данного исследования никак существенно не сказываются на прочностных характеристиках У1, поскольку:

$$F = 2,30, F_{кр} = 2,87 \text{ – для испытаний на межслоевой сдвиг;}$$

$$F = 1,86, F_{кр} = 2,87 \text{ – для испытаний на изгиб,}$$

то есть в данном случае  $F < F_{кр}$ . Это говорит о том, что повышенная температура ( $120^\circ\text{C}$  и  $150^\circ\text{C}$ ) статически незначимый фактор для оценки прочности данного ПКМ.

Что касается исследования влияния жидкостей, то такие жидкости как топливо ТС-1 и Гидравлическая жидкость Skydrol LD-4 при длительном контакте с материалом оказывают существенное влияние на прочностные характеристики углепластика У1.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен сравнительный анализ влияния различных ВВФ на прочность ПКМ У1. Было проведено исследование среднего значения прочности и однофакторного дисперсионного анализа разброса результатов испытаний на межслоевой сдвиг и изгиб.

Значения показателей в Таблицах 4 и 5 недостаточны для заключений о стойкости ПКМ к ВВФ. В каждом конкретном случае необходимы дополнительные исследования для определения влияния температуры и продолжительности воздействия на материал агрессивных жидкостей, чтобы оценивать предельные уровни изменения механических показателей и механизмы физических изменений в материалах.

Статистические показатели  $t$ -критерия Стьюдента в полученных результатах свидетельствует о низкой стойкости ПКМ к эксплуатационным жидкостям, таким как топливо ТС-1 и гидравлическая жидкость Skydrol LD-4.

Наиболее чувствительным для материала, исходя из средних значений прочности, оказалось воздействие режима теплового старения, при этом статистический анализ показал отличные от этого предположения результаты. Однофакторный дисперсионный анализ показал, что исследованные режимы действия повышенной температуры ( $120^\circ\text{C}$  и  $150^\circ\text{C}$ ) статически незначимый фактор для оценки прочности данного ПКМ.

Проведенный анализ указывает на то, что процесс старения полимерных композиционных материалов в эксплуатационных жидкостях и при повышенных температурах представляет собой сложный набор физико-химических изменений в ПКМ. Для выявления этих изменений необходима разработка соответствующих методов исследования. Проведенные исследования демонстрируют возможность выявления основных процессов, в результате которых происходят изменения в механических свойствах полимерных композиционных материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *ГОСТ 5680-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на изгиб плоских образцов.*
2. *ГОСТ 32659-2014. Композиты полимерные. Методы испытаний. Определение кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге методом испытания короткой балки.*
3. *ГОСТ 9.707-81. Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение.*
4. *ГОСТ Р 51369-99. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие влажности.*
5. *ГОСТ Р 58144-2018. Вода дистиллированная. Технические условия.*
6. *ГОСТ 56762-2015. Композиты полимерные. Метод определения влагопоглощения и равновесного состояния.*
7. Каблов Е.Н., Старцев В.О. *Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Научно-технический журнал «Авиационные материалы и технологии». – 2018. – №2(51). – С.47-58.*
8. Старцев В.О. *Влияние агрессивных жидкостей на свойства полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. – 2022. – №8(114). – 08.*
9. Вапиров Ю.М. *Механизмы старения углепластиков авиационного назначения в условиях теплого влажного климата. – М.: ВИАМ, 1989. – 268 с.*
10. Старцев О.В. *Старение полимерных авиационных материалов в теплом влажном климате: дисс. в форме научного доклада. – М.: ВИАМ, 1990. – 80 с.*
11. Startsev O.V., Vapirov Yu.M., Deev I.S., Yartsev V.A., Krivonos V.V., Mitrofanova E.A., Chubarova M.A. *The effect of prolonged atmospheric ageing on the properties and structure of carbon plastic // Mechanics of Composite Materials. – 1986. – No.4. – Pp.636-642.*
12. Степнов М.Н. *Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 94 с.*

## REFERENCES

1. *GOST 5680-2015. Kompozity polimernye. Metod ispytaniya na izgib ploskikh obraztsov [Polymer composites. The bending test method for flat samples].*
2. *GOST 32659-2014. Kompozity polimernye. Metody ispytanij. Opredelenie kazhushhegosya predela prochnosti pri mezhslojnom sdvige metodom ispytaniya korotkoj balki [Polymer composites. Test methods. Determination of the apparent tensile strength at interlayer shear by testing a short beam].*

3. GOST 9.707-81. *Materialy polimernye. Metody uskorenykh ispytaniy na klimaticheskoe starenie [Polymer materials. Methods of accelerated tests for climatic aging].*
4. GOST R 51369-99. *Metody ispytaniy na stojkost' k klimaticheskim vneshnim vozdeystvuyushhim faktoram mashin, priborov i drugikh tekhnicheskikh izdelij. Ispytaniya na vozdeystvie vlazhnosti [Test methods for resistance to climatic external influences of machines, devices and other technical products. Humidity tests].*
5. GOST R 58144-2018. *Voda distillirovannaya. Tekhnicheskie usloviya [Distilled water. Technical conditions].*
6. GOST 56762-2015. *Kompozity polimernye. Metod opredeleniya vlagopogloshheniya i ravnovesnogo sostoyaniya [Polymer composites. A method for determining moisture absorption and equilibrium state].*
7. Kablov E.N., Startsev V.O. *Sistemnyj analiz vliyaniya klimata na mekhanicheskie svoystva polimernykh kompozitsionnykh materialov po dannym otechestvennykh i zarubezhnykh istochnikov [A systematic analysis of the influence of climate on the mechanical properties of polymer composite materials according to domestic and foreign sources (review)]. Nauchno-tekhnicheskij zhurnal "Aviatsionnye materialy i tekhnologii", 2018, No.2(51), Pp.47-58.*
8. Starchev V.O. *Vliyanie agressivnykh zhidkostej na svoystva polimernykh kompozitsionnykh materialov (obzor) [The influence of aggressive organisms on the composition of polymer composite materials (review)]. Trudy VIAM, 2022, No.8(114), 08.*
9. Vapirova Yu.M. *Mekhanizmy stareniya ugleplastikov aviatsionnogo naznacheniya v usloviyakh teplogo vlazhnogo klimata [Mechanisms of aging of carbon fiber plastics for aviation purposes in conditions warm humid climate]. Moskva, VIAM, 1989, 268 p.*
10. Startsev O.V. *Starenie polimernykh aviatsionnykh materialov v teplom vlazhnom klimате: diss. v forme nauchnogo doklada [Aging of polymer aviation materials in a warm humid climate: dissertation in the form of a scientific doc.]. Moskva, VIAM, 1990, 80 p.*
11. Startsev O.V., Vapirova Yu.M., Deev I.S., Yartsev V.A., Krivonos V.V., Mitrofanova E.A., Chubarova M.A. *The effect of prolonged atmospheric aging on the properties and structure of carbon fiber. Mechanics of composite materials, 1986, No.4, Pp.636-642.*
12. Stepanov M.N. *Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy: spravochnik [Statistical methods of processing the results of mechanical tests: handbook]. Moskva, Mashinostroenie, 1985, 94 p.*

Поступила в редакцию 19 июня 2024 года.

---

Сведения об авторах:

Богомолова Анна Дмитриевна – инж. 2 кат., ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», г. Москва, Россия; e-mail: [ann-bogomolova@mail.ru](mailto:ann-bogomolova@mail.ru)  
Синицын Антон Вадимович – вед. инж., ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», г. Москва, Россия