

Научная статья

УДК 620.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-98-114

ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ

В.С. Ерасов¹, И.Г. Сибаяев¹, А.И. Сутубалов¹

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

Аннотация. Рассмотрены методические и материаловедческие задачи, возникающие при механических испытаниях на растяжение образцов из композиционных материалов. Приведен обзор методик испытаний на растяжение полимерных композиционных материалов (ПКМ). Рассмотрены определяемые при испытании на растяжение характеристики материала, а также диаграмма деформирования при «жестком» режиме нагружения. Предложены унифицированный образец для испытаний ПКМ с различными схемами армирования и новые более функциональные обозначения видов разрушений.

Ключевые слова: растяжение, образец, деформация, напряжение, разрушение, живучесть

Для цитирования: Ерасов В.С., Сибаяев И.Г., Сутубалов А.И. Испытания образцов из композиционных материалов на растяжение // Труды ВИАМ. 2023. № 12 (130). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-98-114.

Scientific article

TENSILE TESTING OF COMPOSITE MATERIALS SAMPLES

V.S. Erasov¹, I.G. Sibayev¹, A.I. Sutubalov¹

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

Abstract. Methodological and material science problems arising during mechanical tensile tests of samples made of composite materials are considered. An overview of the methods of tensile testing of polymer composite materials (PCM) is given. The characteristics of the material determined during the tensile test are considered, including the main one – the deformation diagram under the «rigid» loading mode. A unified sample for testing PCM with various reinforcement schemes and new more functional designations of types of destruction are proposed.

Keywords: stretching, sample, deformation, stress, fracture, survivability

For citation: Erasov V.S., Sibayev I.G., Sutubalov A.I. Tensile testing of composite materials samples. *Trudy VIAM*, 2023, no. 12 (130), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-98-114.

Введение

Метод испытания на растяжение является основным и наиболее распространенным методом исследования и контроля механических свойств конструкционных авиационных композиционных материалов [1–37]. Испытание на растяжение часто имитирует

условия, в которых на практике работает материал, и в этих условиях определяют стандартные механические свойства материала. В справочниках и стандартах на конструкционный композиционный материал обязательно приводят механические характеристики, определенные при растяжении, которые используют:

- при разработке новых материалов;
- для контроля качества материалов в процессе производства;
- как приемно-сдаточные испытания;
- при сертификации продукции;
- при анализе причин аварий и катастроф;
- для сравнительного анализа и выбора материала;
- для формулировки по определенным критериям свойств материалов для последующего использования в прочностных расчетах.

Разнообразие областей применения результатов испытаний на растяжение можно объяснить существенными преимуществами данного метода перед другими методами механических испытаний материалов. Преимущества заключаются в точном соответствии метода испытаний теоретическим представлениям о прочности, деформативности и процессе разрушения композиционного материала в условиях одноосного нагружения; простоте форм и многообразии размеров образцов с большой и удобной для исследования рабочей частью; наличии испытательных машин, стандартов, приспособлений и компьютерных программ по управлению процессом испытания и обработке результатов.

Результаты и обсуждение

Диаграмма растяжения

Рассмотрим определяемые при испытании на растяжение характеристики материала. Основной из них, включающей все остальные характеристики, является диаграмма деформирования, которая при «жестком» режиме нагружения определяется уравнением вида $\sigma = F(\epsilon)$. Диаграмма деформирования дает наглядное представление о поведении материала и его механических свойствах в упругой и неупругой областях, показывает влияние схемы армирования на вид и характер разрушения образца. Таким примером представления качества композиционного материала являются диаграммы деформирования, приведенные на рис. 1, для образцов из чистого серебра и модельного композиционного материала (серебро, армированное нитевидными кристаллами сапфира) при различном объемном содержании армирующего наполнителя. В процессе деформирования образца деформация развивается по стадиям. Сначала реализуются высокоскоростные механизмы деформации с низкой энергией активации (упругая деформация), обе фазы материала при этом остаются упругими. На этой стадии (величина деформации до 1,2–1,4 %) выполняется закон Гука, упругая деформация преобладает над остальными видами деформации. Определяемые характеристики (модуль упругости – E , коэффициент Пуассона – μ) представляют способность материала сопротивляться упругому деформированию. Упругие деформации обратимы, они исчезают при снятии нагрузки.

Затем серебряная матрица деформируется пластически с более высокой энергией активации, что делает диаграмму нелинейной (рис. 1, кривые 2 и 3). Диаграмма в виде прямой 1 показывает, что объемное содержание нитевидных кристаллов сапфира величиной 31 % (объемн.) делает композиционный материал упругим с низкой способностью к деформированию из-за накопления большой упругой энергии армирующим наполнителем, которую при разрушении наполнителя пластичная матрица не способна поглотить. Материал прочен, но не энергоемок при разрушении, т. е. обладает низкой живучестью. Применение материала в конструкции требует использования высокого значения коэффициента запаса прочности.

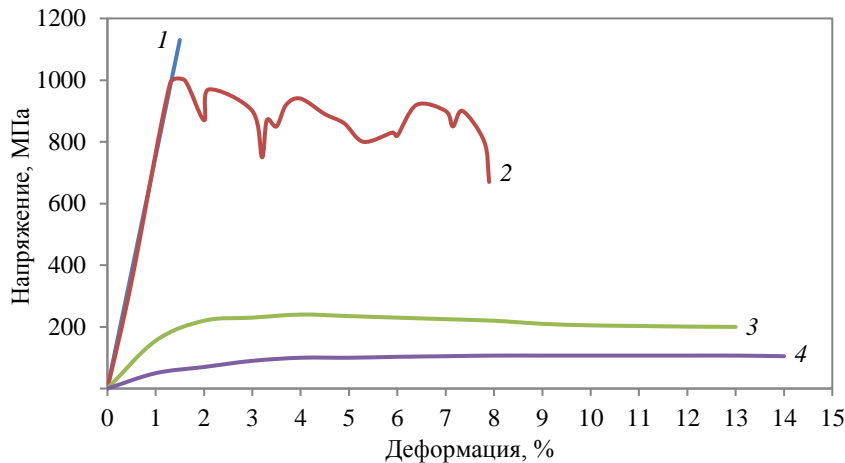


Рис. 1. Диаграммы деформирования образца из чистого серебра (4) и образцов из модельного композиционного материала (серебро, армированное нитевидными кристаллами сапфира) при объемном содержании армирующего наполнителя: 31 (1), 24 (2) и 7 % (объемн.) (3) [37]

При снижении объемного содержания нитевидных кристаллов сапфира до величины 24 % (объемн.) (рис. 1, кривая 2) прочность образца снижается на ~10 %, но при этом в разы увеличивается живучесть материала, которую можно оценить как площадь под кривой по уравнению $A = \int \sigma(\epsilon) d\epsilon$, где σ – напряжение, ϵ – деформация. Ломаная кривая соответствует последовательным разрывам волокон сапфира с последующим перераспределением нагрузки на оставшиеся целыми волокна. Значение величины $A = \int \sigma(\epsilon) d\epsilon$ целесообразно ввести в качестве характеристики композиционного материала, определяющей его удельную энергоемкость разрушения или живучесть. Армирование нитевидными кристаллами сапфира в количестве 7 % (объемн.) незначительно увеличивает прочность материала. Следует отметить, что объемное содержание в количестве в 24 % (объемн.) близко к теоретическому значению для минимального армирования в ~20 % (объемн.), при котором начинает работать правило смеси [23, 37].

Преобладание ковалентных связей и малые размеры поперечного сечения моноволокон армирующих наполнителей вызывают их хрупкость. Управляемый энергоемкий процесс разрушения материала в этих условиях зависит от пластичности матрицы. Однако высокое (>50 % (объемн.)) объемное содержание наполнителей определяет вид матрицы в виде тонких пленок, окружающих волокно (наполнитель), не способных к значительным пластическим деформациям. В современных авиационных изделиях полимерные композиционные материалы (ПКМ) с наполнителями из угле-, стекло- и органических волокон имеют высокие удельные характеристики прочности и жесткости, но низкую деформативность и живучесть.

Обзор методик испытаний на растяжение ПКМ

В авиационных конструкциях ПКМ широко используются в виде слоистых материалов, свойства которых при растяжении определяют на плоских образцах по соответствующим стандартам [3–9]. Анализ стандартов показал, что большинство из них основаны на нормативных положениях международного стандарта ASTM D 3039/D 3039M Standard – Test Methods for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.

Опыт испытаний образцов различных размеров, накопленный авторами данной статьи, а также сведения, приведенные в стандартах и работах [2–5, 7, 9, 16–18], позволяют рекомендовать для испытаний на растяжение слоистых композиционных материалов унифицированный образец, представленный на рис. 2.

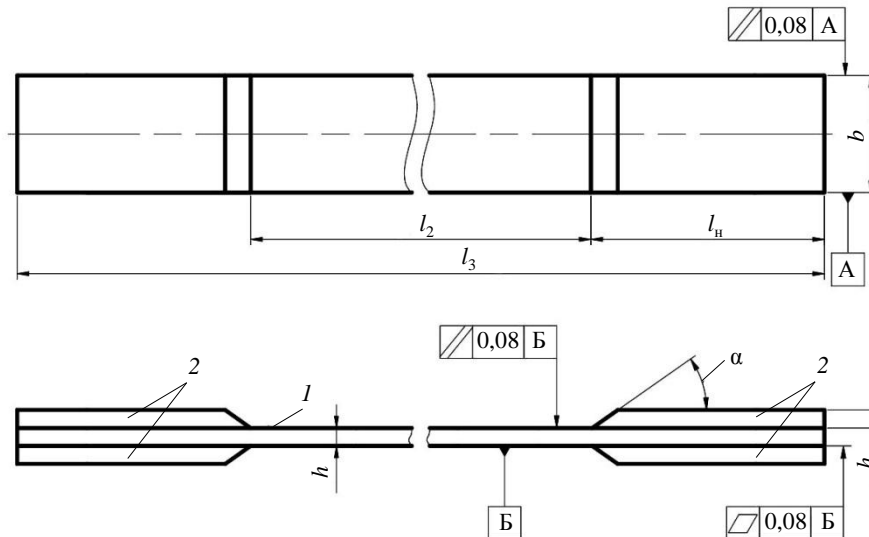


Рис. 2. Образец (1) с накладками (2) для испытаний на растяжение, рекомендуемый стандартами

Рекомендуемые геометрические размеры унифицированного образца для испытаний на растяжение:

Общая длина L_3 , мм	≥ 250
Ширина b , мм	$25 \pm 0,2$
Толщина h , мм	1–5
Рабочая длина (расстояние между накладками) L_2 , мм	150 ± 1
Длина накладок под захваты l_n , мм	≥ 50
Толщина накладок h_n , мм	$\geq 1,5$
Измерительная база L_0 , мм	10–100
Угол скоса накладок α , градус	30–35

Образец в направлении толщины для исключения появления изгибающих моментов должен иметь структуру, симметричную его срединной поверхности, гладкую ровную поверхность без вздутий, сколов, неровностей, надразов, царапин, трещин или других видимых невооруженным глазом дефектов, а также большую удобную для исследования рабочую часть, при качественной механической обработке не чувствительную к «кромочному эффекту» – сильному уменьшению несущей способности площади сечения из-за частичного расслоения матрицы по кромкам образца. Отклонение образцов от номинальных размеров по ширине и толщине рабочей зоны не должно превышать: 1 % – по ширине, 2 % – по толщине.

Такой образец можно использовать для испытаний материалов с различными схемами армирования – определение механических характеристик при сдвиге в плоскости армирования под углами ± 45 градусов при испытании на растяжение. Если испытательная машина оснащена гидравлическими или пневматическими захватами с регулируемым усилием сжатия, следует использовать образцы без накладок. Достаточно обернуть захватные части образца наждачной лентой на тканом основании (рис. 2 и 3). В случае отсутствия таких захватов образец изготавливают с накладками на захватных частях образца. Материал накладок должен иметь модуль упругости в направлении, перпендикулярном оси растяжения, меньше, чем модуль упругости материала образца, т. е. материал накладок должен быть мягче материала образца. Угол скоса накладок α для уменьшения концентрации напряжений в конце накладки должен быть не более 30–35 градусов. Оптимальными являются накладки из материала, аналогичного исследуемому, сформированные сразу при

изготовлении плиты для последующей ее разрезки на образцы. Для таких накладок достаточно одного или двух слоев материала. При таком методе изготовления накладок происходит существенное упрочнение захватных частей образца, исключается операция приклеивания и уменьшается величина давления в захватах, компенсирующая слабость клеевого соединения. Для тонких накладок не требуется изготовление скосов.

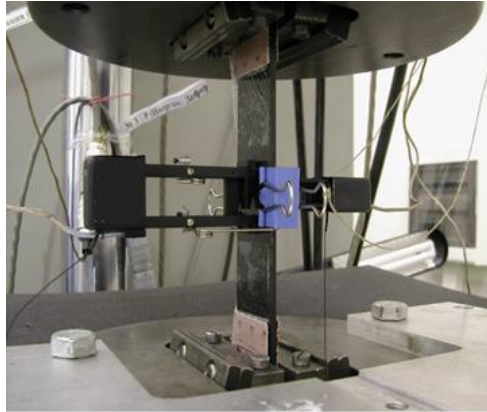


Рис. 3. Образец, закрепленный в гидравлических регулируемых захватах с помощью наждачной ленты

Следует иметь в виду, что усилие разрушения образца с однонаправленным армированием высокопрочными (например, углеродными) волокнами может быть >100 кН, поэтому для испытаний необходимы машины с максимальным усилием, превышающем это значение.

Захваты испытательной машины должны обеспечивать надежное крепление и точное центрирование образца – продольная ось образца должна совпадать с направлением действия растягивающей нагрузки. Для этого рекомендуется применять захваты с насечкой на рабочих поверхностях под углом ± 45 градусов с шагом от 1 до 2 мм на длине от 100 до 105 мм.

Правильность установки образца в захватах испытательной машины (отсутствие эксцентриситета) проверяют, измеряя упругие удлинения образца на двух противоположных сторонах. Разница между их значениями и значением среднего арифметического деформаций должна быть не более 5 % от среднего арифметического значения, характеризующего слой, в котором отсутствуют деформации от изгиба. Измерение удлинений проводят на контрольном образце с тремя наклеенными тензорезисторными датчиками на двух противоположных сторонах (рис. 4).

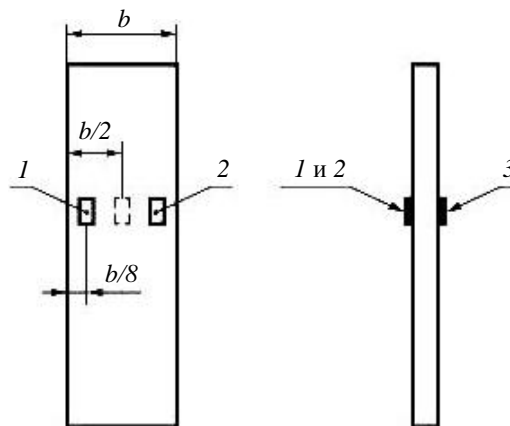


Рис. 4. Схема контрольного образца с тремя тензорезисторными датчиками (1–3) для проверки центровки силовой цепочки испытательной машины

Образец деформируют, пока каждый датчик не покажет относительную деформацию удлинения не менее 0,0005. Величину деформации нейтрального слоя образца, в котором отсутствует влияние изгиба вокруг центральной оси Y , направленной по ширине образца, определяют по формуле

$$\varepsilon_{ave} = \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \varepsilon_3 \right) / 2, \quad (1)$$

в которой $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – величины продольной деформации по показаниям датчиков 1–3.

Следует получить значение ε_{ave} – не менее 0,001. Влияние деформации изгиба по толщине B_Y и ширине B_Z образца в процентах рассчитывают следующим образом:

$$B_Y = \frac{\varepsilon_{ave} - \varepsilon_3}{\varepsilon_{ave}} \cdot 100, \quad (2)$$

$$B_Z = \frac{2(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{3\varepsilon_{ave}} \cdot 100. \quad (3)$$

Это значение должно быть не более 5 %. Если величина B_Y или B_Z больше 5 %, необходимо перенастроить силовую цепочку испытательной машины.

В стандарте [5] присутствует ошибка в формуле по определению величины B_Z , приводящая к увеличению влияния изгиба в 2 раза по отношению к результатам расчета в стандартах [3] и [4]. Приведем вывод формулы (3). На рис. 5 представлена эпюра деформаций образца при наличии изгиба вокруг центральной оси Z , направленной перпендикулярно плоскости образца.

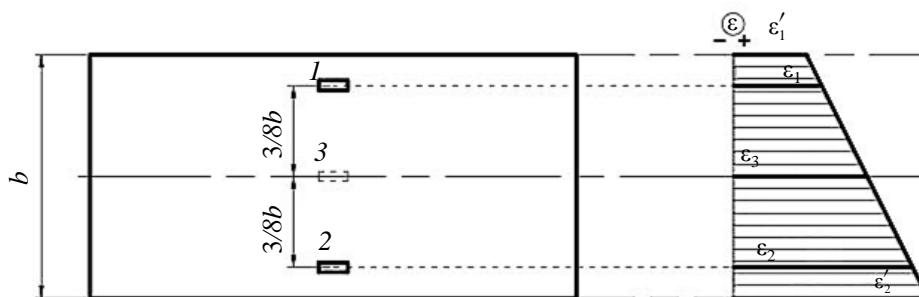


Рис. 5. Эпюра деформаций образца при наличии изгиба вокруг центральной оси Z

По показаниям тензодатчиков 1–3 величины продольной деформации равны соответственно $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$. При этом из расположения датчиков следует:

$$\varepsilon_3 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / 2, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ave} = \frac{1}{2} \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \varepsilon_3 \right] = \varepsilon_3, \quad (5)$$

$$\varepsilon = kx + \varepsilon'_1 = \varepsilon'_1 + \frac{4x(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{3b}, \quad 0 \leq x \leq b, \quad (6)$$

$$k = \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{b} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1), \quad (7)$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_1' + \frac{4}{3} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \frac{1}{b} \cdot \frac{b}{2}, \quad (8)$$

$$\varepsilon_1' = \varepsilon_3 - \frac{2}{3} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1), \quad (9)$$

$$B_z = \left[\frac{\varepsilon_{ave} - \varepsilon_1'}{\varepsilon_{ave}} \right] \cdot 100 = \left[\frac{2}{3} \left(\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_{ave}} \right) \right] \cdot 100. \quad (10)$$

Для большинства материалов рекомендуется применять типовые тензодатчики с измерительной базой 6 мм, сопротивлением 350 Ом и предельной деформацией 3 %.

Для измерения деформаций и управления испытанием при «жестком» режиме нагружения следует использовать экстензометры, обладающие измерительной базой от 10 до 100 мм. Чем больше рабочая база экстензометра, тем точнее управление испытанием и запись диаграммы деформирования. Оптимальным является использование экстензометра, позволяющего регистрировать деформацию одновременно на противоположных сторонах образца и показывать ее среднее значение. Для исключения проскальзывания ножей экстензометра по поверхности образца можно приклеить их быстросохнущим клеем или крепить их на тонкие полоски скотча или лейкопластыря, наклеенного на образец. По измеряемому диапазону деформаций (допустимому приращению измерительной базы) и точности экстензометры должны соответствовать классу B1 [38]. В случаях, когда величина систематической погрешности измерений, допускаемой для экстензометров класса B1, оказывается неприемлемой (измерения деформации высокомодульных ПКМ), следует применять экстензометры класса A.

Повышенная чувствительность ПКМ к влаге и температуре требует перед механическими испытаниями приведения состояния образцов по влагонасыщению и температуре к стандартным условиям. Для этого образцы перед испытанием подвергают кондиционированию. Для кондиционирования используют камеру искусственного климата, позволяющую создавать и поддерживать на заданном уровне стандартную лабораторную атмосферу 23/50 [39], либо образцы кондиционируют непосредственно в помещении испытательной лаборатории, если оно отвечает требованиям к условиям окружающей среды. При указании условий кондиционирования в нормативно-технической документации на материал кондиционирование следует проводить при указанных в этой документации температуре, атмосфере и продолжительности испытаний, в протоколе которых должны быть описаны условия кондиционирования образцов. Если регламентированное кондиционирование не проводили, то в протоколе испытаний следует указать, что образцы не кондиционировали.

Авиационные конструкционные слоистые ПКМ испытывают при температурах от -60 °С до температуры, превышающей температуру эксплуатации на 25–50 °С.

При испытаниях полимерных материалов, имеющих состояния от стеклообразного до высокоэластичного, необходим учет влияния фактора времени. Это требует регламентации продолжительности испытания, времени нагрева и выдержки при температуре испытания. В большинстве рассмотренных стандартов [3–9, 17] указано, что эти показатели должны соответствовать требованиям нормативного документа на материал. Если такие требования отсутствуют, приводят рекомендации по выбору скорости

деформирования или скорости перемещения подвижной траверсы испытательной машины. На современных испытательных машинах деформирование образца рекомендуют проводить со скоростью относительной деформации $0,01 \text{ мин}^{-1}$, что обеспечивает достижение параметра $\varepsilon = 0,01$ за одну минуту. На машинах, на которых это невозможно, нагружение образца обеспечивают за счет скорости перемещения подвижной траверсы, которую определяют экспериментально, чтобы время нагружения образцов до разрушения составляло $1,0 \pm 0,5$ мин. Рекомендуемая скорость перемещения подвижной траверсы составляет 2 мм/мин.

Диаграммы деформирования образцов из ПКМ обычно имеют линейный или близкий к линейному вид (рис. 6). На линейном участке диаграммы определяют модуль упругости (E) и коэффициент Пуассона (μ), которые вычисляют по формулам:

$$E = \frac{\sigma'' - \sigma'}{\varepsilon'' - \varepsilon'}$$

$$\mu = -\frac{\Delta\varepsilon'}{\Delta\varepsilon''}$$

где $\sigma' = E\varepsilon'$, $\sigma'' = E\varepsilon''$ (рис. 6); $\Delta\varepsilon'$, $\Delta\varepsilon''$ – изменение соответственно поперечной и продольной относительной деформации при изменении напряжения на $\Delta\sigma$ (на рис.6 – $\Delta\sigma = \sigma'' - \sigma'$).

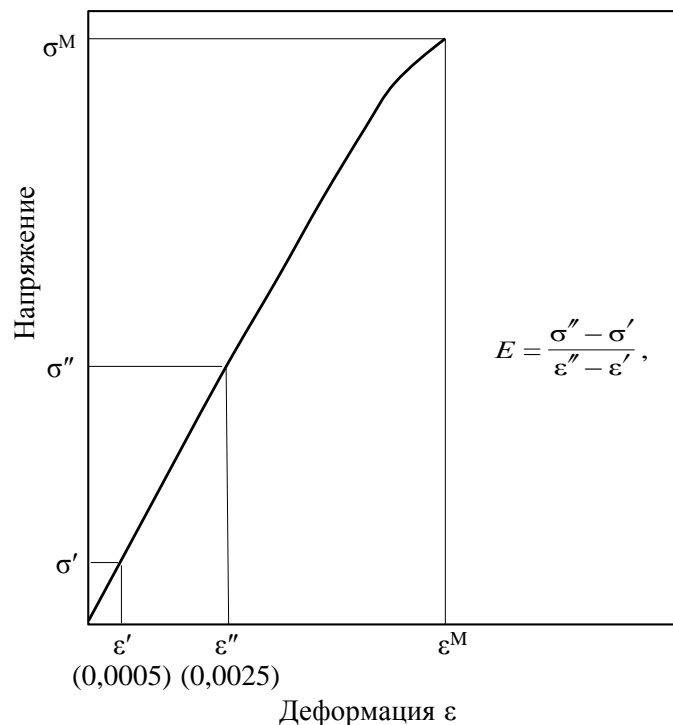


Рис. 6. Типичная диаграмма деформирования образца из слоистого полимерного композиционного материала (ε^M , σ^M – соответственно деформация и напряжение монослоя)

Прочность (временное сопротивление или предел прочности) при растяжении (σ_B) определяют делением максимальной нагрузки, выдержанной образцом (P_{\max}), на площадь его исходного поперечного сечения $b \cdot h$ (где b , h – ширина и толщина образца соответственно): $\sigma_B = P_{\max}/(b \cdot h)$.

При одинаковых n -слоях материала (рис. 7) для проектирования конструкций и расчетов на прочность определяют прочность монослоя по формуле $\sigma_b^M = \sigma_b / n$.

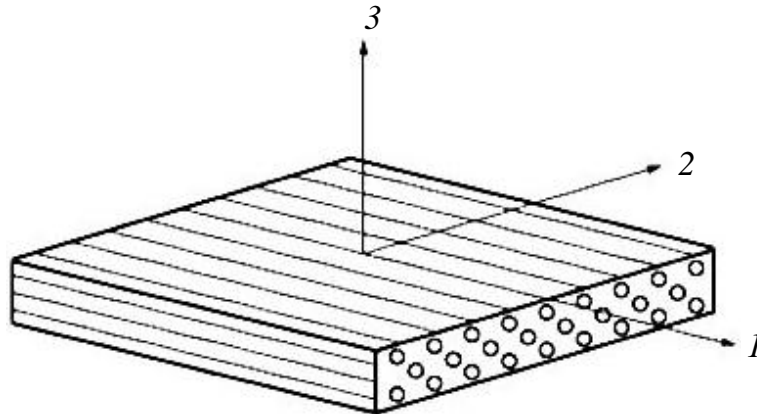


Рис. 7. Слоистый полимерный композиционный материал, армированный волокнами в одном направлении, и принятое обозначение осей координат

Относительное удлинение при разрушении (δ) определяют по формуле $\delta = (\Delta l_p / l_p) \cdot 100 \%$ (где Δl_p – абсолютное удлинение рабочей длины образца при разрушении; l_p – рабочая длина образца).

В ПКМ пластические свойства матрицы начинают проявляться при упругом поведении армирующих наполнителей. В гибридных металлополимерных материалах (рис. 8) пластические свойства металлических слоев также проявляются при еще упругом поведении слоев из ПКМ [40], в результате чего диаграммы деформирования имеют перелом (рис. 9). Величину деформации перелома называют деформацией перехода ($\epsilon_{пер}$), которую определяют графически по пересечению условно линейных участков диаграммы. Деформация перехода зависит от величины процентного содержания наполнителя, соотношений модулей упругости матрицы и наполнителя, а также соотношения металлических и полимерных слоев в гибридных материалах. Таким образом, величина деформации $\epsilon_{пер}$ близка к значению условной деформации текучести в металлическом материале, поэтому в качестве прочностной характеристики логично введение соответствующего деформации $\epsilon_{пер}$ значения напряжения перехода $\sigma_{пер}$.

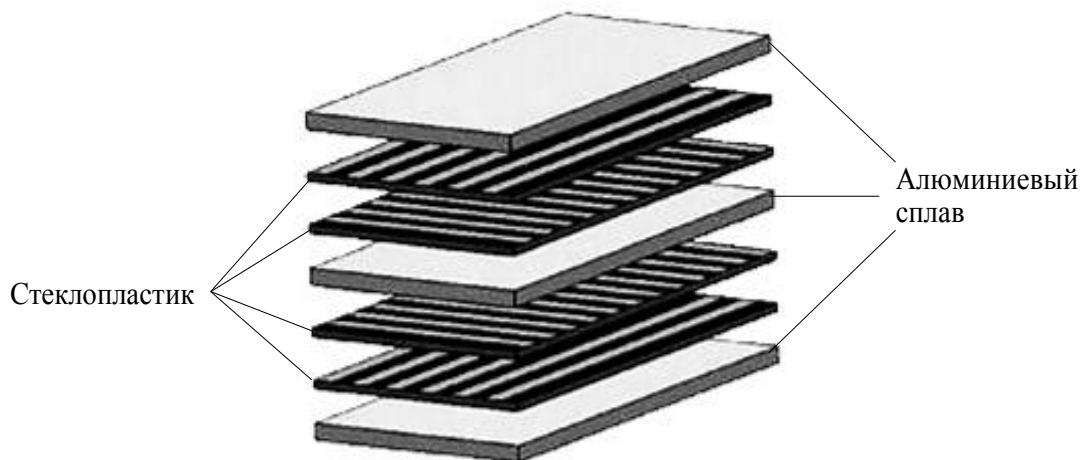


Рис. 8. Структура гибридного материала GLARE-3 [40]

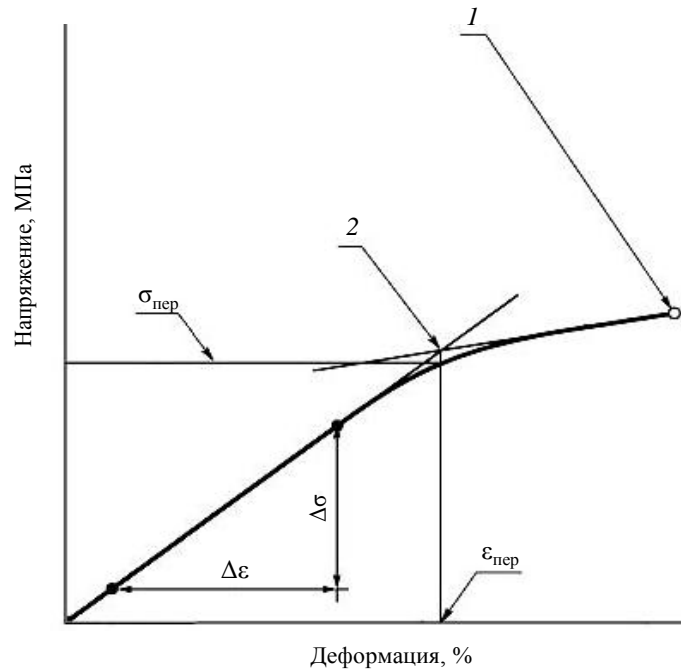


Рис. 9. Определение деформации перехода на билинейной диаграмме деформирования гибридного композиционного материала: 1 – максимальное напряжение; 2 – точка перехода

Компьютерные программы позволяют быстро обработать и представить результаты испытания. Однако такой показатель испытания, как вид разрушения образца, еще в программах не отработан, и его определение является субъективным мнением испытателя. Испытатель визуально должен определить вид (тип), зону (объем) и место разрушения для каждого образца. Для описания вида разрушения используют трехбуквенный код (см. таблицу).

Трехбуквенный код видов разрушения образцов

Первая буква		Вторая буква		Третья буква	
Вид (тип) разрушения	Код	Зона (объем) разрушения	Код	Местоположение разрушения	Код
В губках под накладками	З(Г)	В захватах	З(И)	В нижней части образца	Н(В)
		Проскальзывание в захватах или накладках	Ц(А)	В верхней части образца	В(Т)
Косой излом (под углом)	У(А)	В зоне на расстоянии менее одной ширины образца от захвата	Ш(W)	В центральной части образца	Ц(М)
Горизонтальное поперек образца	Г(Л)	В рабочей зоне	Р(Г)	Множественное (минимум в двух местах)	М(V)
Многотиповое	М(...) [M(xyz)]	Множественное (минимум в двух местах)	М(М)		
Взрывное	В(Х)	Не определена	Н(U)		
Начало разрушения с расслоения боковых граней	Р(Д)				
Наличие продольного расщепления	П(С)				
Иные виды разрушения	И(О)				

В таблице приведены обозначения, используемые в стандартах [3, 4], а также сделанные авторами данной статьи уточнения. Латинские буквы, используемые в стандарте [3], указаны в скобках. Примеры кодированного описания вида разрушения представлены на рис. 10 [3, 4].

Предложенное кодирование имеет существенные недостатки. В стандарте [4] применена одна буква П для обозначения двух видов разрушения. Образец следует считать разрушенным, когда он полностью разделился на части. До этого момента он повреждается и имеет живучесть. Образцы 1, 2, 4, 6, 9 на рис. 10 не разделены на части, т. е. их нельзя считать разрушенными. После доработки рис. 10 виды разрушения представлены на рис. 11. В таблице приведены уточненные определения и кодовые обозначения разрушений образцов. Коды местоположения разрушения по сравнению со стандартами [3, 4] (имеют по 7 кодов) сокращены до четырех обозначений, так как разрушения с левой или правой сторон образца не могут быть полными, а определение местоположения разрушения как неизвестное или неопределенное не имеет смыслового содержания. Когда разрушение происходит вне рабочей зоны образца, результат такого испытания не учитывают, и соответствующую запись заносят в протокол испытания. Но могут быть и исключения из данного правила. Например, при оценке требования к прочности материала не менее установленной величины получают результаты испытания больше ее значения, но с разрушением образцов в захватах или вне рабочей части. Ясно, что при разрушении в рабочей части значения будут еще больше.

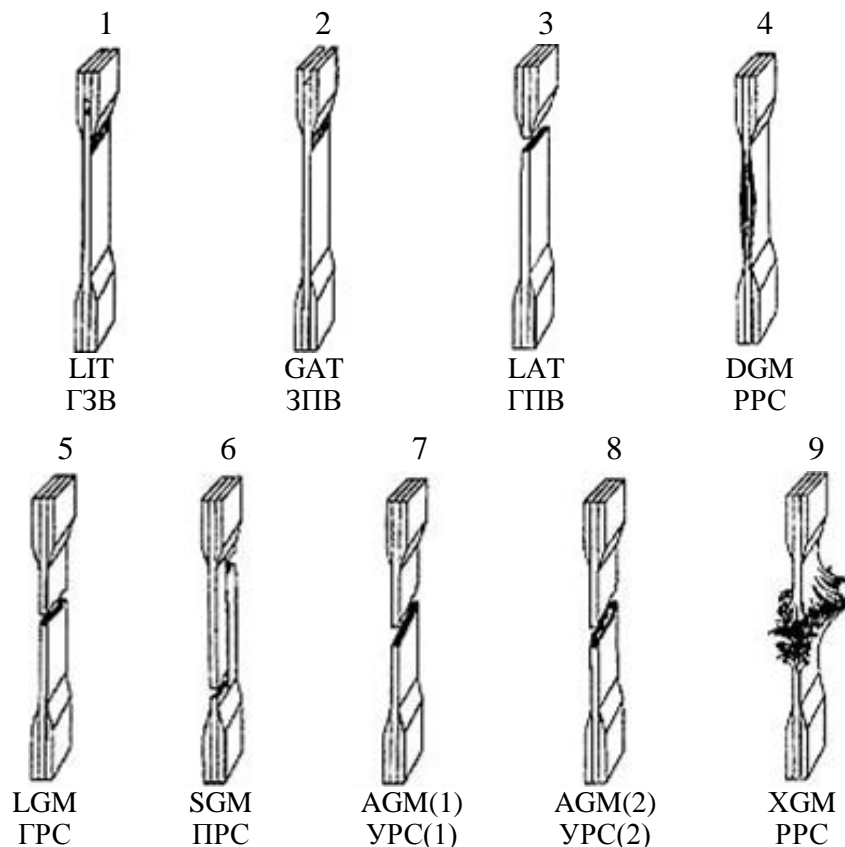
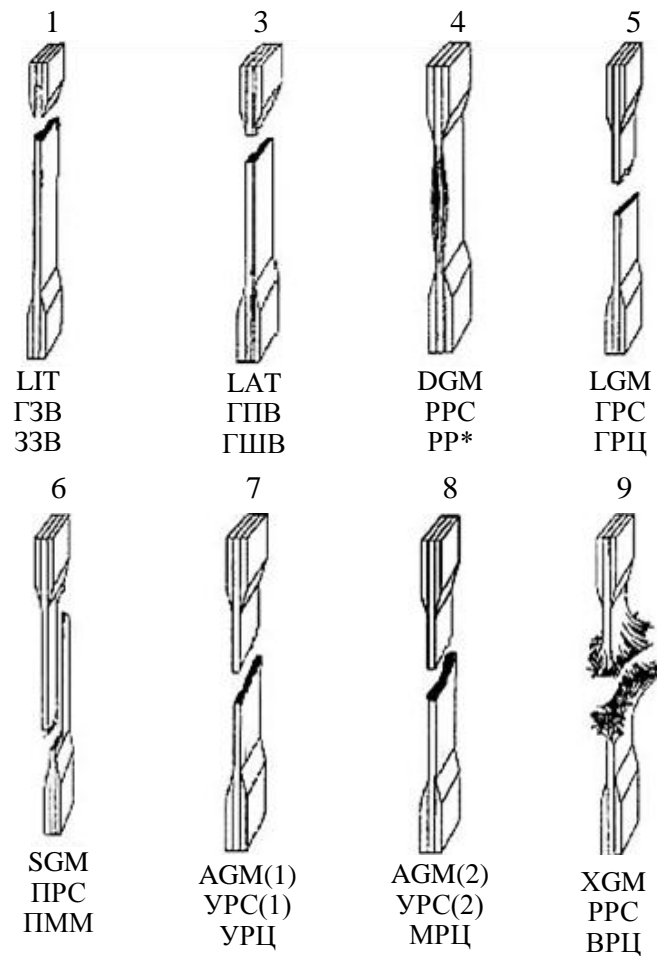


Рис. 10. Типовые виды разрушения образцов из полимерных композиционных материалов при растяжении согласно ASTM D3039/D3039M-17 и ГОСТ Р 56785–2015



*Образец разрушился частично, его дальнейшее испытание нецелесообразно.

Рис. 11. Предлагаемые типовые виды разрушения образцов из полимерных композиционных материалов при растяжении

Результаты испытания следует зафиксировать и соответствующую запись о месте разрушения занести в протокол испытания. Однако это не исключает необходимости перенастройки силовой цепочки испытательной машины.

Заключения

Рассмотрены методические и материаловедческие задачи, необходимые для качественного проведения испытаний на растяжение образцов из композиционных материалов. Проведен сравнительный анализ международных методик испытаний на растяжение ПКМ. Рассмотрены определяемые при испытании на растяжение характеристики материала.

Предложены унифицированный образец для испытаний материалов с различными схемами армирования, а также более функциональные обозначения видов разрушений.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексного научного направления 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [41–49].

Список источников

1. Тарнопольский Ю.М., Киндис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1981. 272 с.
2. ASTM D4762-18. Standard Guide for Testing Polymer Matrix Composite Materials. American Society for Testing and Materials, 2018. 25 p.
3. ASTM D3039/D3039M-17. Standard Test Methods for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. American Society for Testing and Materials, 2017. 13 p.
4. ГОСТ Р 56785–2015. Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов. М.: Стандартинформ, 2015. 20 с.
5. ГОСТ 32656–2017. Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение М.: Стандартинформ, 2017. 32 с.
6. ГОСТ 25.601–80. Расчеты 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. 15 с.
7. ISO 527-4:2021. Plastics – Determination of tensile properties – Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites, 2021. 27 p.
8. EN 2561:1995. Aerospace series – Carbon fibre reinforced plastics – Unidirectional laminates – Tensile test parallel to the fibre direction. CEN, 1995. 14 p.
9. EN 2597:1998. Aerospace series – Carbon fibre reinforced plastics – Unidirectional laminates – Tensile test perpendicular to the fibre direction. CEN, 1998. 16 p.
10. ГОСТ 32658–2014. Композиты полимерные. Определение механических характеристик при сдвиге в плоскости армирования методом испытания на растяжение под углом ± 45 град. М.: Стандартинформ, 2014. 15 с.
11. ASTM D5766/D5766M-11. Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates. American Society for Testing and Materials, 2018. 7 p.
12. ASTM D6742/D6742M-12. Standard Practice for Filled-Hole Tension and Compression Testing of Polymer Matrix Composite Laminates. American Society for Testing and Materials, 2012. 8 p.
13. Вильдеман В.Э., Третьяков В.П. Испытания материалов с построением полных диаграмм деформирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 2. С. 93–98.
14. Забулонов Д.Ю., Мыктыбеков Б., Ухов П.А. Сравнение отечественных и зарубежных методов испытаний полимерных композиционных материалов // Научные труды (Вестник МАТИ). 2009. № 15 (87). С. 287–292.
15. Адамов А.А., Лаптев М.Ю., Горшкова Е.Г. Анализ отечественной и зарубежной нормативной базы по механическим испытаниям полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2012. № 3. С. 72–77.
16. Ильичев А.В., Раскутин А.Е., Гуляев И.Н. Сравнение геометрических размеров образцов ПКМ, используемых в международных стандартах ASTM и отечественных ГОСТ // Новости материаловедения. Наука и техника. 2015. № 4 (16). Ст. 05. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 09.08.2023).
17. Ильичев А.В. Сравнение стандартов ГОСТ и ASTM для проведения механических испытаний ПКМ на растяжение // Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам: приложение к журналу «Все материалы. Энциклопедический справочник». 2015. № 8. С. 2–9.
18. Евдокимов А.А., Гуляев И.Н., Зеленина И.В. Исследование физико-механических свойств и микроструктуры объемно-армированного углепластика // Труды ВИАМ. 2019. № 4 (76). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-38-47.
19. Шершак П.В., Рябовол Д.Ю. Стандарты по динамическим механическим испытаниям пластмасс и полимерных композитных материалов // Авиационная промышленность. 2017. № 4. С. 48–52.
20. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / под ред. Ю.В. Соколкина. М.: Физматлит, 1997. 288 с.

21. Принципы создания композиционных полимерных материалов / А.А. Берлин, С.А. Вольфсон, В.Г. Ошмян, Н.С. Ениколопов. М.: Химия, 1990. 240 с.
22. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. М.: Изд-во МГУ, 1984. 352 с.
23. Композиционные материалы: справочник / под ред. Д.М. Карпиноса. Киев: Наукова думка, 1985. 592 с.
24. Ванин Г.А. Микромеханика композиционных материалов. Киев: Наукова думка, 1985. 304 с.
25. Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. М.: Химия, 1981. 232 с.
26. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. Композиционные материалы: справочник / под ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
27. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 270 с.
28. Кристенсен Р.М. Введение в механику композитов. М.: Мир, 1982. 336 с.
29. Механика композиционных материалов. Под ред. Дж. Сендецки. М.: Мир, 1978. 564 с.
30. Jones R.M. Mechanics of Composite materials. 2nd ed. Taylor & Francis, 1999. 519 p.
31. Тканые конструкционные композиты. М.: Мир, 1990. 432 с.
32. Тарнопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А. Пространственно-армированные композиционные материалы. М.: Машиностроение, 1987. 224 с.
33. Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Тарлаковский Д.В. Теория упругости и пластичности. М.: Физматлит, 2002. 416 с.
34. Димитриенко Ю.И. Основы механики твердого тела. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. Т. 4: Механика сплошной среды. 624 с.
35. Гольдман А.Я. Прогнозирование деформационно-прочностных свойств полимерных и композиционных материалов. Л.: Химия, 1988. 272 с.
36. Димитриенко Ю.И., Кашкаров А.И. Расчет эффективных характеристик композитов с периодической структурой методом конечного элемента // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Естественные науки. 2002. № 2. С. 95–108.
37. Монокристалльные волокна и армированные ими материалы / под ред. А.Т. Туманова. М.: Мир, 1973. 464 с.
38. ASTM E83-10. Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems. American Society for Testing and Materials, 2010. 19 p.
39. ГОСТ 12423–2013 (ISO 291:2008). Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб). М.: Стандартинформ, 2014. 11 с.
40. Подживотов Н.Ю., Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ерасов В.С., Серебренникова Н.Ю., Абдуллин М.Р., Лимонин М.В. Слоистые металлополимерные материалы в элементах конструкции воздушных судов // Перспективные материалы. 2016. № 10. С. 5–19.
41. Гриневиц Д.В., Яковлев Н.О., Славин А.В. Критерии разрушения полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 7 (79). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111.
42. Димитриенко Ю.И., Губарева Е.А., Сборщиков С.В., Ерасов В.С., Яковлев Н.О. Численное моделирование и экспериментальное исследование деформирования упругопластических пластин при смятии // Математическое моделирование и численные методы. 2015. № 1 (5). С. 67–82.
43. Яковлев Н.О., Ерасов В.С., Петрова А.П. Сравнение нормативных баз различных стран по испытанию клеевых соединений материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2014. № 7. С. 2–8.
44. Яковлев Н.О., Гуляев А.И., Попкова Е.А. Оценка геометрических параметров углеродных волокон // Мат. XIV Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «Физико-механические испытания, прочность и надежность современных конструкционных и функциональных материалов». М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2022. С. 227–239.

45. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 440–448.
46. Яковлев Н.О., Попкова Е.А., Ландик Д.Н. Деформация как критерий качества углеродного волокна // *Мат. VII Всерос. науч.-техн. конф. «Роль фундаментальных исследований при реализации стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г.»*. М.: ФГУП ВИАМ, 2021. С. 198–203.
47. Славин А.В., Силкин А.Н., Гриневич Д.В., Яковлев Н.О. Композиционные материалы с объемно-армированной структурой (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 8 (114). Ст. 9. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-113-122.
48. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2001. № 1. С. 3–8.
49. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Уткин Д.А. Методы определения механических характеристик материалов с помощью индентирования (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.08.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-104-118.

References

1. Tarnopolsky Yu.M., Kintsis T.Ya. *Methods of static testing of reinforced plastics*. 3rd ed., rev. and add. Moscow: Khimiya, 1981, 272 p.
2. ASTM D4762-18. *Standard Guide for Testing Polymer Matrix Composite Materials*. American Society for Testing and Materials, 2018, 25 p.
3. ASTM D3039/D3039M-17. *Standard Test Methods for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. American Society for Testing and Materials, 2017, 13 p.
4. State Standard R 56785–2015. *Polymer composites. Tensile test method for flat samples*. Moscow: Standartinform, 2015, 20 p.
5. State Standard 32656–2017. *Polymer composites. Test methods. Tensile tests*. Moscow: Standartinform, 2017, 32 p.
6. State Standard 25.601–80. *Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of composite materials with a polymer matrix (composites). Method of tensile testing of flat samples at normal, elevated and low temperatures*. Moscow: Standards Publishing House, 1980, 15 p.
7. ISO 527-4:2021. *Plastics – Determination of tensile properties – Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites*, 2021, 27 p.
8. EN 2561:1995. *Aerospace series – Carbon fibre reinforced plastics – Unidirectional laminates – Tensile test parallel to the fibre direction*. CEN, 1995, 14 p.
9. EN 2597:1998. *Aerospace series – Carbon fibre reinforced plastics – Unidirectional laminates – Tensile test perpendicular to the fibre direction*. CEN, 1998, 16 p.
10. State Standard 32658–2014. *Polymer composites. Determination of mechanical characteristics during shear in the plane of reinforcement by tensile testing at an angle of ± 45 degrees*. Moscow: Standartinform, 2014, 15 p.
11. ASTM D5766/D5766M-11. *Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates*. American Society for Testing and Materials, 2018. 7 p.
12. ASTM D6742/D6742M-12. *Standard Practice for Filled-Hole Tension and Compression Testing of Polymer Matrix Composite Laminates*. American Society for Testing and Materials, 2012, 8 p.
13. Vildeman V.E., Tretyakov V.P. Testing of materials with construction of complete strain diagrams. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin*, 2013, no. 2. pp. 93–98.
14. Zabulonov D.Yu., Myktybekov B., Ukhov P.A. Comparison of domestic and foreign methods for testing polymer composite materials. *Nauchnyye trudy (Vestnik MATI)*, 2009, no. 15 (87). pp. 287–292.
15. Adamov A.A., Laptev M.Yu., Gorshkova E.G. Analysis of domestic and foreign regulatory framework for mechanical testing of polymer composite materials. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2012, no. 3. pp. 72–77.

16. Ilyichev A.V., Raskutin A.E., Gulyaev I.N. Comparison of the geometric dimensions of PCM samples used in international ASTM standards and domestic GOST standards. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2015, no. 4 (16), art. 05. Available at: <http://www.materialsnews.ru> (accessed: August 09, 2023).
17. Ilyichev A.V. Comparison of GOST and ASTM standards for mechanical tensile testing of PCM. *Comments on standards, specifications, certificates: supplement to journal «Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik»*, 2015, no. 8, pp. 2–9.
18. Evdokimov A.A., Gulyaev I.N., Zelenina I.V. Investigation of the physicomechanical properties and microstructure of volume-reinforced carbon fiber reinforced plastic. *Trudy VIAM*, 2019, no. 4 (76), paper no. 05. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: August 16, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-38-47.
19. Shershak P.V., Ryabovol D.Yu. Standards for dynamic mechanical testing of plastics and polymer composite materials. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2017, no. 4, pp. 48–52.
20. Wildeman V.E., Sokolkin Yu.V., Tashkinov A.A. *Mechanics of inelastic deformation and fracture of composite materials*. Ed. Yu.V. Sokolkina. Moscow: Fizmatlit, 1997, 288 p.
21. *Principles of creating composite polymer materials*. Moscow: Khimiya, 1990, 240 p.
22. Pobedrya B.E. *Mechanics of composite materials*. Moscow: Moscow State Univ. Publ. House, 1984, 352 p.
23. *Composite materials: reference book*. Ed. D.M. Karpinos. Kyiv: Naukova Dumka, 1985, 592 p.
24. Vanin G.A. *Micromechanics of composite materials*. Kyiv: Naukova Dumka, 1985, 304 p.
25. Gunyaev G.M. *Structure and properties of polymer fiber composites*. Moscow: Khimiya, 1981, 232 p.
26. Vasiliev V.V., Protasov V.D., Bolotin V.V. *Composite materials: reference book*. Ed. V.V. Vasilyeva, Yu.M. Tarnopolsky. Moscow: Mashinostroyenie, 1990, 512 p.
27. Vasiliev V.V. *Mechanics of structures made of composite materials*. Moscow: Mashinostroyenie, 1988, 270 p.
28. Christensen R.M. *Introduction to the mechanics of composites*. Moscow: Mir, 1982, 336 p.
29. *Mechanics of composite materials*. Ed. J. Sendeci. Moscow: Mir, 1978, 564 p.
30. Jones R.M. *Mechanics of Composite materials*. 2nd ed. Taylor & Francis, 1999, 519 p.
31. *Woven structural composites*. Moscow: Mir, 1990, 432 p.
32. Tarnopolsky Yu.M., Zhigun I.G., Polyakov V.A. *Spatially reinforced composite materials*. Moscow: Mashinostroyenie, 1987, 224 p.
33. Gorshkov A.G., Starovoitov E.I., Tarlakovsky D.V. *Theory of elasticity and plasticity*. Moscow: Fizmatlit, 2002, 416 p.
34. Dimitrienko Yu.I. *Fundamentals of solid mechanics*. Moscow: Bauman MSTU Publ. house, 2013, vol. 4: Continuum mechanics, 624 p.
35. Goldman A.Ya. *Prediction of deformation-strength properties of polymer and composite materials*. Leningrad: Khimiya, 1988, 272 p.
36. Dimitrienko Yu.I., Kashkarov A.I. Calculation of the effective characteristics of composites with a periodic structure by the finite element method. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman, ser.: Natural Sciences*, 2002, no. 2, pp. 95–108.
37. *Monocrystal fibers and materials reinforced by them*. Ed. A.T. Tumanov. Moscow: Mir, 1973, 464 p.
38. ASTM E83-10. *Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems*. American Society for Testing and Materials, 2010, 19 p.
39. State Standard 12423–2013 (ISO 291:2008). *Plastics. Conditioning conditions and testing of samples (specimen)*. Moscow: Standartinform, 2014, 11 p.
40. Podzhivotov N.Yu., Kablov E.N., Antipov V.V., Erasov V.S., Serebrennikova N.Yu., Abdullin M.R., Limonin M.V. Layered metal-polymer materials in aircraft structural elements. *Perspektivnye materialy*, 2016, no. 10, pp. 5–19.
41. Grinevich D.V., Yakovlev N.O., Slavin A.V. The criteria of the failure of polymer matrix composites (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), paper no. 11. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: August 16, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111.

42. Dimitrienko Yu.I., Gubareva E.A., Sborshchikov S.V., Erasov V.S., Yakovlev N.O. Numerical modeling and experimental study of the deformation of elastoplastic plates under compression. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody*, 2015, no. 1 (5), pp. 67–82.
43. Yakovlev N.O., Erasov V.S., Petrova A.P. Comparison of regulatory frameworks in different countries for testing adhesive joints of materials. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2014, no. 7, pp. 2–8.
44. Yakovlev N.O., Gulyaev A.I., Popkova E.A. Assessment of geometric parameters of carbon fibers. *Mat. XIV All-Rus. conf. on testing and research into the properties of materials «Physical and mechanical tests, strength and reliability of modern structural and functional materials»*. Moscow: National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM, 2022, pp. 227–239.
45. Erasov V.S., Yakovlev N.O., Nuzhnyj G.A. Qualification tests and researches of durability of aviation materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 440–448.
46. Yakovlev N.O., Popkova E.A., Landik D.N. Deformation as a quality criterion for carbon fiber. Reports VII All-Rus. scientific-technical conf. “The role of fundamental research in the implementation of strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period until 2030”. Moscow: VIAM, 2021, pp. 198–203.
47. Slavin A.V., Silkin A.N., Grinevich D.V., Yakovlev N.O. Composite materials with a 3D-reinforced structure (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 8 (114), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 16, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-113-122.
48. Kablov E.N. Quality control of materials is a guarantee of safe operation of aviation equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2001, no. 1, pp. 3–8.
49. Oreshko E.I., Erasov V.S., Yakovlev N.O., Utkin D.A. Methods for determining the mechanical characteristics of materials using indentation (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 16, 2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-1-104-118.

Информация об авторах

Ерасов Владимир Сергеевич, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сибасв Илья Гоярович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сутубалов Александр Игоревич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vladimir S. Erasov, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ilya G. Sibayev, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander I. Sutubalov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 20.09.2023; получена после доработки 18.10.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 31.10.2023.

The article was submitted 20.09.2023; received in revised form 18.10.2023; approved and accepted for publication after reviewing 31.10.2023.