

Научная статья

УДК 691.175.5/8

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-169-180

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СОХРАНЯЕМОСТЬ И ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ СВОЙСТВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ УГЛЕРОДНОГО МОНОВОЛОКНА

А.И. Сутубалов¹, М.Р. Котлярова¹, А.Р. Дашкин¹, Н.О. Яковлев¹

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

Аннотация. Проанализированы ключевые аспекты, влияющие на стабильность физико-механических характеристик углеродных волокон, а также показана их связь с термодинамической устойчивостью углеродного волокна, которая не является гарантией сохраняемости свойств из-за деградации аппрета под воздействием внешних факторов. Проведен обзор существующих стандартов испытаний на растяжение моноволокна (ГОСТ, ISO, ASTM). Рассмотрены системные погрешности при определении диаметра и площади поперечного сечения волокна и особенности регистрации деформации, а также проведены испытания на растяжение моноволокна.

Ключевые слова: углеродное моноволокно, углеродная элементарная нить, деградация аппрета, срок хранения, испытание на растяжение, погрешность измерений

Для цитирования: Сутубалов А.И., Котлярова М.Р., Дашкин А.Р., Яковлев Н.О. Анализ факторов, влияющих на сохраняемость и точность определяемых свойств при растяжении углеродного моноволокна // Труды ВИАМ. 2026. № 8 (162). С. 169–180. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-169-180.

Scientific article

ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE PRESERVATION AND ACCURACY OF THE PROPERTIES DETERMINED DURING THE STRETCHING OF CARBON MONOFILAMENT

A.I. Sutubalov¹, M.R. Kotlyarova¹, A.R. Dashkin¹, N.O. Yakovlev¹

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

Abstract. This article analyzes key aspects affecting the stability of the physical and mechanical properties of carbon fibers and demonstrates the relationship between these properties and the thermodynamic stability of carbon fiber, which does not guarantee the retention of properties due to the degradation of the sizing agent under external factors. A review of existing monofilament tensile testing standards (GOST, ISO, ASTM) is provided. Systematic errors in determining fiber diameter and cross-sectional area, in conducting monofilament tensile testing, and in recording strain are discussed.

Keywords: carbon monofilament, carbon elementary filament, degradation of the sizing agent, shelf life, tensile test, measurement error

For citation: Sutubalov A.I., Kotlyarova M.R., Dashkin A.R., Yakovlev N.O. Analysis of factors affecting the preservation and accuracy of the properties determined during the stretching of carbon monofilament. *Trudy VIAM*, 2026, no. 8 (162), pp. 169–180. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-169-180.

Введение

Современные полимерные композиционные материалы (ПКМ), армированные углеродными волокнами, представляют собой один из наиболее перспективных классов материалов для применения в высокотехнологичных отраслях – авиации, космонавтике, автомобилестроении, энергетике и строительстве [1–5]. Их широкое внедрение обусловлено уникальным сочетанием высокой удельной прочности и жесткости, устойчивостью к коррозии, малой плотностью и возможностью направленного проектирования свойств [1, 6].

Однако на практике часто возникает проблема несоответствия заявленных и фактических свойств материала [7], поступающего в производство. Вопрос сохранения уровня свойств углеродного волокна в процессе хранения часто трактуется неоднозначно, а методы контроля качества не всегда обеспечивают необходимую точность [8–10]. Принципиальное значение имеет разделение понятий стабильности самого волокна и стабильности его поверхностного модификатора (аппрета) [11].

Данная статья посвящена анализу двух взаимосвязанных аспектов: факторов, влияющих на сохраняемость физико-механических свойств катушек с углеродным волокном, и источников погрешности при определении их физико-механических характеристик стандартизированными методами проведения испытаний при растяжении моноволокон.

Работа выполнена 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») при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Факторы, определяющие сохраняемость свойств углеродных волокон

Влияние температурно-влажностного режима

Углеродные волокна, обладающие графитоподобной структурой с высокой степенью ковалентных связей в базисных плоскостях, характеризуются термодинамической стабильностью и химической инертностью в отсутствие окислителей при условии нормальных температур [11].

Однако промышленные углеродные волокна поступают к потребителю в форме катушек с нанесенным на их поверхность тонким слоем аппрета в количестве 1,0–1,5 % по общей массе [12]. Данный полимерный слой выполняет критически важные функции: защищает нити от абразивного износа при размотке, связывает элементарные волокна в жгут и обеспечивает адгезию к полимерной матрице при изготовлении ПКМ [13–15].

В отличие от углеродного волокна, аппрет представляет собой термодинамически неравновесную полимерную систему, чувствительную к температуре, влажности и времени. При нарушении рекомендуемого температурно-влажностного режима хранения структура аппрета и его поверхностные свойства могут изменяться, что в перспективе приводит к снижению межфазной адгезии в ПКМ [13–16]. Таким образом, именно скорость и характер протекания процессов деструкции в слое аппрета являются определяющими факторами, ограничивающими период гарантированной пригодности материала [16].

Загрязнение поверхности волокна

Помимо внутренних процессов деградации, существенное влияние на состояние поверхности волокон оказывает миграция низкомолекулярных компонентов из упаковочных материалов. Исследования [9] демонстрируют, что при хранении углеродных

волокон в полиолефиновых пакетах происходит диффузия технологических добавок полиэтилена, в частности эрукамида, на поверхность элементарных нитей (жгутов). Накопление загрязнителей отслеживается по увеличению количества и интенсивности сигналов от азотсодержащих групп посредством рентгеновской фотоэлектронной и инфракрасной спектроскопии. Методом фрагментации одиночного волокна выявлено, что контаминация не приводит к статистическому изменению среднего значения сдвиговой прочности, однако наблюдается рост дисперсии длин фрагментов. Это указывает на наличие локальных неоднородностей на границе раздела фаз, обусловленных загрязнением поверхности. Таким образом, при определении срока годности катушек углеродного волокна необходимо учитывать не только температурно-влажностный режим, но и химическую совместимость волокна и упаковочных материалов.

Влияние аппрета на повреждаемость волокна и сохраняемость прочности

В зарубежных исследованиях [17], посвященных влиянию аппрета на эксплуатационные характеристики углеродных волокон, описаны следующие ключевые функции аппрета: снижение частоты обрывов и повреждений элементарных волокон при намотке и формирование более стабильного соединения волокна с полимерной матрицей за счет улучшения смачиваемости и адгезии. Это подтверждается экспериментальными данными [17] при испытании на растяжение микропластиков (углеродный жгут, полностью пропитанный полимерным связующим и отвержденный в виде монолитного образца с накладками) в соответствии с ISO 10618:2004 (рис. 1): для неаппретированных углеродных волокон изменение прочности при растяжении в процессе намотки составляет $\sim(14,4\text{--}22,4)\%$, тогда как для волокон, проклеенных составами А, В и С, диапазон изменения снижается приблизительно до $5,9\text{--}7,3$; $4,2\text{--}6,0$ и $4,3\text{--}5,8\%$ соответственно, что указывает на выраженный защитный эффект аппрета в условиях механического натяжения при намотке. Эти значения получены при трех уровнях натяжения (20; 30 и 40 Н) в процессе намотки, причем для всех уровней натяжения фиксируется одинаковая тенденция изменения прочности при переходе от неаппретированных к аппретированным волокнам. Под изменением прочности в данном случае понимают разность между пределом прочности при растяжении после намотки и исходным состоянием волокна, выраженное в процентах.

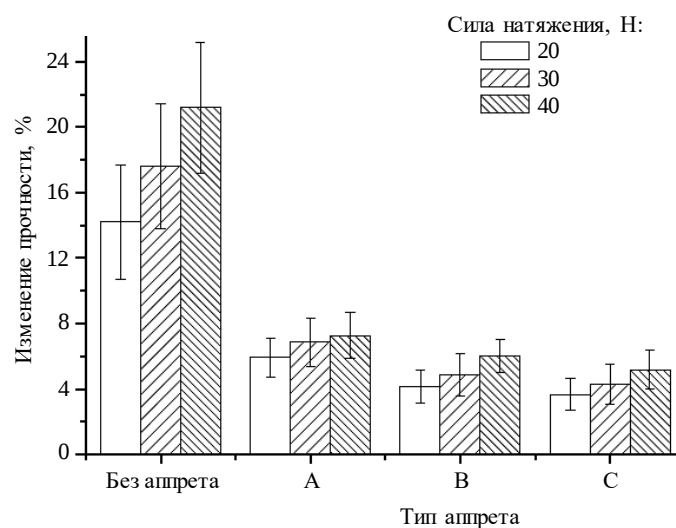


Рис. 1. Изменение прочности при испытании на растяжение углеродных волокон в зависимости от типа аппрета и силы натяжения жгута при намотке

В дополнение к этим данным в работе [18] исследуется влияние различных аппретов на прочность углеродного моноволокна и микропластика для высокопрочных волокон класса T800. Сопоставлены три партии углеродных волокон T800, изготовленные по одинаковой технологии, но обработанные различными аппретами (А, В и С). Испытания на растяжение моноволокон в соответствии с ASTM D3379 показали, что для волокон с аппретами А и С средняя прочность моноволокон по трем партиям составляет 4,84 и 4,93 ГПа соответственно, тогда как для аппрета В она снижается до ~4,50 ГПа. Аналогичная тенденция прослеживается при испытании на растяжение микропластиков в соответствии с GB/T 26749: средняя прочность при растяжении для волокон с аппретами А и С находится на уровне, равном 5,56 и 5,84 ГПа соответственно, тогда как для аппрета В она составляет ~5,42 ГПа.

Можно сделать вывод, что технологические отклонения/изменения в процессе производства исходного аппрета влияют на конечные свойства углеродного волокна и конструкции из ПКМ.

Обзор стандартизированных методов испытаний на растяжение моноволокна и анализ погрешностей

Оценка уровня физико-механических свойств невозможна без проведения корректных механических испытаний [19, 20]. С учетом того, что истирание волокон в жгуте [17] и изменение состава аппрета [18] способны приводить к снижению прочности моноволокна при растяжении, критически важным становится выбор методологии, обеспечивающей высокую точность.

Основу нормативной базы составляют ГОСТ 32667–2014 (модифицированный ISO 11566:1996) и ГОСТ Р 57603–2017 (модифицированный ASTM C1557-14). Стандарты имеют некоторые различия в параметрах испытаний: ГОСТ 32667–2014 рекомендует длину рабочей области 25 мм, тогда как ГОСТ Р 57603–2017 фиксирует 25,4 мм (1 дюйм); скорость перемещения активного захвата по ГОСТ 32667–2014 устанавливается в диапазоне 1–5 мм/мин, в то время как ГОСТ Р 57603–2017 рекомендует выбирать скорость, обеспечивающую разрыв образца в течение 30 с.

Вышеприведенные методики испытаний сопровождаются рядом систематических и случайных погрешностей, влияющих на достоверность получаемых значений предела прочности и модуля упругости. Основными источниками ошибок являются: неточное определение площади поперечного сечения волокна, несоответствие оси образца оси нагрузки, особенности крепления образца в захватах испытательной машины, а также используемые способы регистрации деформации, не всегда обеспечивающие необходимую точность. Суммарное влияние вышеперечисленных факторов обуславливает несоответствие истинных и измеренных характеристик материала, что делает необходимым детальный анализ при интерпретации результатов испытаний.

Погрешность определения геометрических параметров

Первым значимым источником ошибки является определение диаметра волокна [19, 21, 22]. Напряжение рассчитывается как отношение приложенной силы к площади поперечного сечения ($\sigma = F/S$). Поскольку площадь сечения вычисляется через диаметр ($S = \pi d^2/4$), любая ошибка в измерении диаметра возводится в квадрат в итоговом значении напряжения. Например, погрешность измерения диаметра всего 5 % приводит к ошибке в расчете напряжения ~10 %.

В стандартах на испытание при растяжении волокон используют стандарт ГОСТ 32666–2014 (модификация к ISO 11567:1995), который предусматривает четыре метода определения диаметра.

Метод А – основан на измерении линейной плотности элементарной нити (жгут, состоящий из n волокон) без аппрета и плотности материала элементарной нити; дает усредненное значение диаметра d для жгута по формуле (1) без учета разброса значений диаметров отдельных волокон:

$$d = \sqrt{\frac{4t \cdot 10^3}{\pi \rho c}}, \quad (1)$$

где t – линейная плотность комплексной нити, текс; ρ – плотность элементарной нити, г/см³; c – число волокон в элементарной нити, шт.

Метод В – основан на прямом измерении диаметра d в трех равноудаленных друг от друга точках по всей рабочей длине образца с помощью оптического микроскопа (используется не менее 1000-кратное увеличение). В качестве образцов для испытания используют элементарные волокна длиной 50 мм, закрепленные на рамке с помощью клейкой ленты или клея. Образец помещают между предметным и покровным стеклами – это обязательное условие, при котором предотвращаются хаотические вибрации волокна вследствие воздушных потоков и иных внешних воздействий. Допускается проводить измерения диаметра на образцах, которые впоследствии будут испытаны на растяжение. Однако точность данного метода существенно зависит от операторской ошибки при идентификации границы волокна на изображении. Кроме того, в стандарте не рекомендуется применять этот метод к измерению элементарных волокон диаметром <10 мкм из-за эффектов дифракции, что создает существенную методическую проблему, поскольку диаметр многих углеродных моноволокон составляет 5–8 мкм [23].

Метод С – основан на определении с помощью микроскопа диаметра и площади поперечного сечения разрезанного элементарного волокна в отвержденной заливочной термореактивной полимерной матрице, поверхность которой полируют после отверждения перпендикулярно оси элементарной нити. В качестве образцов для испытания используют волокна длиной ~30 мм, которые помещают в жидкое связующее, отверждают, а затем полируют поверхность с помощью шлифовального станка в несколько этапов с использованием абразивной бумаги и порошка оксида алюминия или алмазной пасты. Измерения проводят по цифровому изображению или фотографии с использованием калиброванной шкалы масштаба. Допускается использовать оптический микроскоп с увеличением $\times(1000\text{--}1500)$ и/или сканирующий электронный микроскоп (с нанесением тонкого слоя металла). При испытании волокон диаметром >10 мкм рекомендуется использовать оптический микроскоп, при диаметре <10 мкм – электронный. Точность метода ограничивается дифракцией света (электронного луча). Данный метод предпочтителен в ситуациях, когда форма поперечного сечения волокон не является круглой (рис. 2). В таком случае площадь поперечного сечения S определяют по цифровому изображению с использованием специализированного программного обеспечения, после чего вычисляют эквивалентный диаметр по формуле

$$d = 2\sqrt{S/\pi}. \quad (2)$$

К существенным недостаткам этого метода относится тот факт, что определяемый диаметр носит номинальный характер для всей выборки, тогда как для корректного расчета напряжений требуется знание фактического диаметра каждого конкретного образца, подвергаемого испытанию на растяжение. Как показано на рис. 2, площадь

поперечного сечения образца 1 существенно меньше площади поперечного сечения образца 2, что при использовании номинального диаметра приведет к значительной погрешности в определении напряжений.

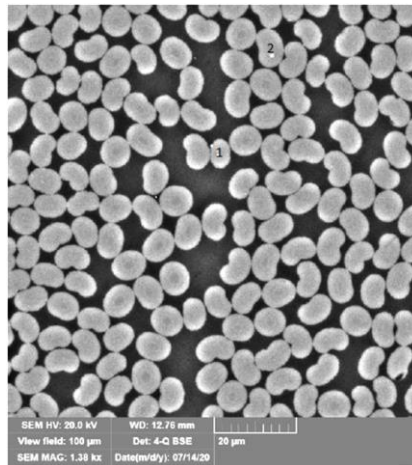


Рис. 2. Изображение, показывающее возможную форму поперечного сечения углеродного волокна [16]

Метод D – основан на определении диаметра с помощью лазерной дифрактометрии. Суть метода состоит в том, что элементарную нить располагают в лазерном луче, формируя на экране дифракционную картину. На экране измеряют расстояние между двумя ближайшими к центру темными зонами, после чего диаметр рассчитывают по известной зависимости (3), учитывающей длину волны лазера и геометрические параметры оптической схемы. Для получения среднего значения диаметра образец поворачивают вокруг оси до угла 165 градусов с шагом в 15 градусов и повторяют измерения:

$$d = \frac{\lambda D}{l}, \quad (3)$$

где λ – длина волны лазерного света, мкм; D – расстояние между образцом и экраном, мм; l – половина расстояния между двумя темными зонами, наиболее близко расположенными к центру дифракционной картины, мм.

Для элементарных волокон с другой формой поперечного сечения, например овальной или в форме почки (рис. 2), этот метод дает «кажущийся» диаметр. Ключевым достоинством метода является бесконтактность измерений непосредственно на образцах, используемых при испытании на растяжение, однако точность данного метода напрямую зависит от внешних факторов: вибраций, статичности фиксации образца, точности юстировки оптической системы.

Таким образом, рассмотренные методы либо дают усредненные значения диаметра для выборки, либо чувствительны к ошибкам оператора и конфигурации сечения. В результате возникает дополнительная погрешность при вычислении площади поперечного сечения моноволокна, что напрямую влияет на определение напряжения при его растяжении.

В данных условиях особый интерес представляет использование специализированных программных средств, позволяющих анализировать цифровые изображения поперечного сечения волокна. В настоящее время разработана и зарегистрирована Программа [24], предназначенная для автоматизированного определения геометрических параметров углеродного моноволокна по изображению. Программа позволяет получать такие параметры, как шероховатость, овальность, диаметр, площадь, периметр и ряд

других характеристик непосредственно по фактической форме контура поперечного сечения волокна.

Программа обрабатывает изображение волокна и последовательно выполняет следующие операции: предварительная обработка и бинаризация изображения, выделение единичного волокна, инверсия цвета и получение контура; расчет радиусов описанной, эквивалентной и вписанной окружностей; построение зависимости шероховатости от параметра функции сглаживания; преобразование контура из полярной в декартову систему координат с формированием зависимостей радиуса и диаметра от угловой координаты.

Принцип работы включает подготовку образца с использованием высокоточных отрезных и шлифовальных станков, шлифовально-полировальных установок и вакуумного оборудования для ионного травления. Затем с помощью растрового электронного микроскопа получают цифровое изображение поперечного сечения волокна, которое затем подвергают автоматизированной обработке. Обработка включает в себя удаление шумов, бинаризацию, выделение единичного волокна, детектирование границ и расчет геометрических параметров. Использование данного подхода позволяет корректно определять некруглую форму сечения и снижает влияние ошибок оператора.

Соосность и крепление образца в захваты испытательной машины

При установке образца в захваты испытательной машины незначительное отклонение оси моноволокна от направления прикладываемой нагрузки приводит к возникновению изгибающих моментов и преждевременному разрушению [8, 21]. Обеспечение строгой соосности оси волокна и направления прикладываемой нагрузки является сложной инженерной задачей, так как диаметр волокон равен 5–8 мкм. Кроме того, стандартные механические захваты создают локальные концентрации напряжений на волокне, что требует использования демпфирующих накладок на зажимных губках захватов, позволяющих сместить зону разрушения в рабочую часть образца.

В работе [8] приведена количественная оценка влияния нарушения соосности между осью волокна и направлением прикладываемой нагрузки. Согласно разработанной аналитической модели с подтверждением методом конечных элементов, погрешность определения модуля упругости пропорциональна $\cos^3\theta$, а предела прочности $\cos^2\theta$. Практически это означает, что угол рассогласования 10 градусов приводит к снижению модуля упругости на 4,49 %, а прочности при разрыве – на 1,52 %. Таким образом, угол рассогласования до 10 градусов не приводит к значительной (>5 %) методической погрешности.

Методы регистрации деформации

Для определения модуля упругости и предельной деформации при разрушении необходима точная регистрация фактической деформации волокна. Стандарты допускают два принципиально разных подхода к измерению деформации. *Первый подход* – косвенный, основанный на регистрации перемещения активного захвата с последующей коррекцией на податливость испытательной системы, которая определяется экспериментально путем серии испытаний образцов с различной рабочей длиной. Данный метод широко распространен из-за своей доступности, однако принципиально не способен исключить погрешности, связанные с проскальзыванием волокна в захватах, нелинейной деформацией монтажной подложки и рамки-держателя. По сути, измеряется перемещение точек, заведомо не совпадающих с рабочей зоной волокна, что вносит неконтролируемую систематическую ошибку. *Второй подход*, допускаемый только в ГОСТ Р 57603–2017 (ASTM C1557-14), предполагает прямое измерение деформации с помощью бесконтактных оптических систем, фиксирующих перемещение меток,

нанесенных непосредственно на рабочую поверхность волокна. Этот метод потенциально способен обеспечить более высокую точность, поскольку измерение производится именно в той зоне, где происходит деформирование и последующее разрушение. Однако ключевая проблема заключается в том, что стандарт ограничивается лишь общим упоминанием возможности применения бесконтактных методов, но не содержит детализированных требований и рекомендаций по их практической реализации. Отсутствует также регламентация таких критически важных аспектов, как:

- способ нанесения меток, исключающий повреждение волокна;
- выбор оптимальной базы измерения, которая, с одной стороны, должна быть достаточной для корректной работы оптической системы, а с другой – обеспечивать положение, когда нанесенные метки не создают локальных зон с повышенной жесткостью (например, за счет нанесения клеевого состава);
- способ учета или уменьшения влияния внеплоскостных колебаний волокна в процессе нагружения, вызванных вибрациями, воздушными потоками или иными внешними воздействиями.

Таким образом, бесконтактный метод, несмотря на свой потенциал, остается чувствительным к ошибкам оператора, что приводит к ограниченной сопоставимости и воспроизводимости получаемых результатов.

Дополнительная методическая погрешность связана с выбором участка кривой на диаграмме «деформация–напряжение», используемого при определении модуля упругости. В действующих стандартах ГОСТ 32667–2014 и ГОСТ Р 57603–2017 отсутствуют рекомендации по выбору участка расчета модуля упругости в случае волокон с нелинейной диаграммой деформирования (рис. 3). В частности, для углеродных волокон, у которых модуль упругости возрастает по мере увеличения деформации [25, 26], использование фиксированных диапазонов (400–800 мН/текс или 0,05–0,25 %) может приводить к систематическому занижению получаемых значений.

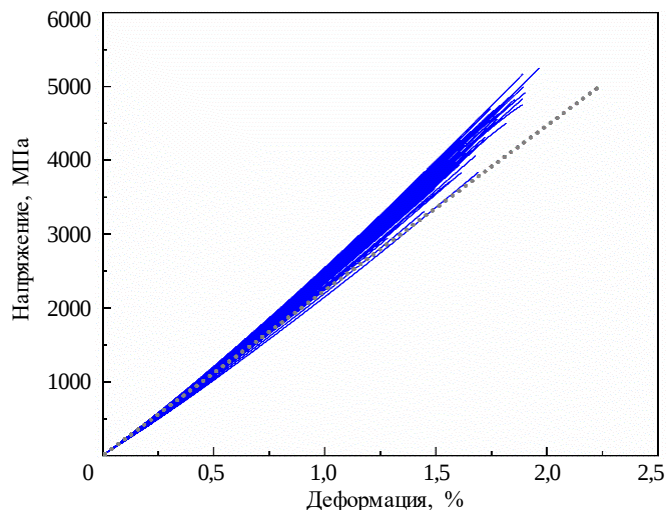


Рис. 3. Диаграммы деформирования при испытаниях на растяжение углеродных моноволокон [25]

Отмечена также обратная зависимость между диаметром волокна и его модулем упругости (рис. 4). Показано, что с уменьшением диаметра волокна модуль упругости возрастает. Авторы статьи [25] объясняют этот эффект более высокой степенью ориентации кристаллитов, достигаемой при увеличении вытяжки прекурсора из полиакрилонитрила. Данная физическая корреляция вносит дополнительный вклад в погрешность определения свойств, так как вариация диаметров в пределах партии волокон неизбежно вызывает изменение механических характеристик.

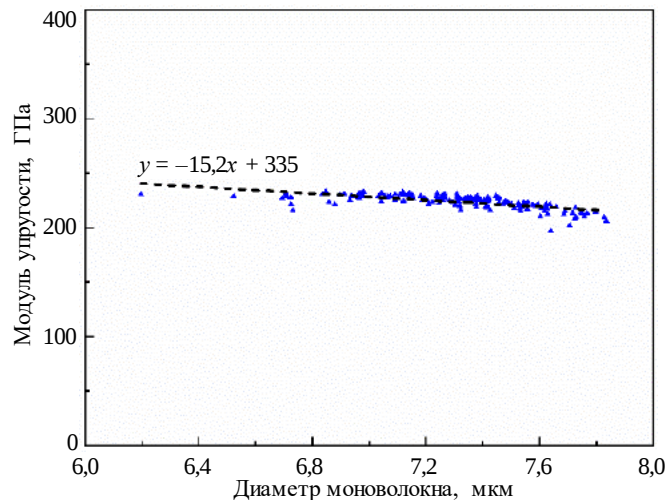


Рис. 4. Взаимосвязь модуля упругости и диаметра углеродного моноволокна [25]

Заключения

Анализ факторов, ограничивающих срок годности катушек с углеродным волокном, показывает, что во многом определяющим элементом является не само волокно, обладающее термодинамической стабильностью, а состояние аппарата. Нарушение температурно-влажностного режима, миграция низкомолекулярных компонентов из упаковочных материалов, технологические отклонения/изменения в процессе производства исходного аппарата приводят к деградации поверхностного слоя с последующим изменением межфазного взаимодействия системы «волокно–полимерная матрица».

Одновременно с этим действующие стандартизированные методики испытаний на растяжение моноволокна (ГОСТ, ISO, ASTM) содержат ряд систематических источников погрешности, связанных с определением диаметра и площади поперечного сечения, обеспечением соосности образца с вектором прикладываемой нагрузки и реализацией методов регистрации деформации. Так, нарушение соосности на 10 градусов приводит к снижению определяемых характеристик при испытании на растяжение (~4,5 % – для модуля упругости и ~1,5 % – для предела прочности).

Перспективными направлениями преодоления методических погрешностей являются:

- разработка автоматизированных алгоритмов обработки изображений, позволяющих определять контур волокна с высокой степенью повторяемости, исключая влияние человеческого фактора;
- бесконтактное измерение деформации с детализированными требованиями к оборудованию, подготовке образцов и проведению испытаний.

Список источников

1. Mallick P.K. Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design. 3rd ed. CRC Press, 2007. 632 p.
2. Гуляев И.Н., Клименко О.Н., Лонский С.Л., Славин А.В., Черфас Л.В. Определение состава и структуры полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 4 (81). С. 32–47. URL: <https://journal.viam.ru/ru> (дата обращения: 17.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-4-32-47.
3. Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Сидорина А.И., Соловьева Н.А. Усталость конструкционных органопластиков // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 1 (74). С. 89–100. URL: <https://journal.viam.ru/ru> (дата обращения: 17.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-89-100.

4. Шершак П.В., Яковлев Н.О., Шокин Г.И., Куцевич К.Е., Попкова Е.А. Метод оценки и факторы, влияющие на качество склеивания обшивки с сотовым наполнителем в конструкциях пола и интерьера воздушных судов // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 81–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-81-88.
5. Гуляев А.И., Яковлев Н.О., Крылов В.Д., Лашов О.А. Применение фрактографического анализа при исследовании межслоевого разрушения ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 3 (48). С. 65–73. DOI: 10.18577/9140-2071-2017-0-3-65-73.
6. Chand S. Review: Carbon fibers for composites // *Journal of Materials Science*. 2000. Vol. 35. P. 1303–1313. DOI: 10.1023/A:1004780301489.
7. Harikrishnan R., Mohite P.M., Upadhyay C.S. Generalized Weibull model-based statistical tensile strength of carbon fibres // *Archive of Applied Mechanics*. 2018. Vol. 88. P. 1617–1636. DOI: 10.1007/s00419-018-1391-9.
8. Chevallier A., Boutenel F., Guichet V. et al. Single fibre tensile testing: analysing the influence of fibre misalignment // *21st European Conference on Composite Materials*. Nantes, France, 2024, art. hal-04738979.
9. Li Q., Woodhead A.L., Church J.S., Naebe M. On the detection of carbon fibre storage contamination and its effect on the fibre–matrix interface // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. Art. 16446. DOI: 10.1038/s41598-018-34609-y.
10. Сутубалов А.И., Подживотов Н.Ю., Шершак П.В., Яковлев Н.О. Оценка однородности физико-механических свойств полуфабрикатов авиационного назначения // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 1 (74). С. 121–135. URL: <https://journal.viam.ru/ru> (дата обращения: 17.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-121-135.
11. Huang X. Fabrication and Properties of Carbon Fibers // *Materials*. 2009. Vol. 2. P. 2369–2403. DOI: 10.3390/ma2042369.
12. Начаркина А.В., Зеленина И.В., Валуева М.И., Воронина О.Г. Влияние аппретирования углеродного волокна при получении объемно-армированных преформ на свойства высокотемпературного углепластика // *Труды ВИАМ*. 2021. № 1 (95). С. 54–65. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.04.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-54-65.
13. Sizing agent for carbon fiber, carbon fiber, carbon fiber-reinforced composite material, and method of producing carbon fiber-reinforced composite material: pat. WO 2015/049567 A1; appl. 30.09.14; publ. 09.04.15.
14. Sizing agent for carbon fiber, method for sizing carbon fiber by said sizing agent, sized carbon fiber and knitted or woven fabric using said carbon fiber: pat. US 7135516 B2; appl. 30.07.02; publ. 14.11.06.
15. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Изотова Т.Ф. Влияние аппретов на свойства термопластичных стеклопластиков // *Труды ВИАМ*. 2014. № 9. С. 47–52. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.04.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-7-7.
16. Shenghe Tech. Carbon Fiber Storage Life and Handling Requirements. URL: <https://shenghetech.com/info-detail/carbon-fiber-storage-life-and-handling-requirements> (дата обращения: 02.03.2026)
17. Zhang S., Gu H., Zhao M. et al. Effect of sizing agents on tensile properties of carbon fiber filament wound structures // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2024. Vol. 19. P. 1–8. DOI: 10.1177/15589250231183159.
18. Yang T., Zhao Y., Liu H. et al. Effect of sizing agents on surface properties of carbon fibers and interfacial adhesion of carbon fiber/bismaleimide composites // *ACS Omega*. 2021. Vol. 6. P. 23028–23037. DOI: 10.1021/acsomega.1c01103.
19. Волкова О.Ю., Татусь Н.А. Современные методы определения характеристик волокон // *Вестник научно-технического развития*. 2025. № 177. С. 3–14. URL: <http://www.vntr.ru> (дата обращения: 25.02.2026). DOI: 10.18411/vntr2025-177-1.
20. Ерасов В.С., Сибяев И.Г., Сутубалов А.И., Попкова Е.А., Горбовец М.А. Методики механических испытаний по определению прочности углеродных волокон // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 2 (75). С. 137–148. URL: <https://journal.viam.ru/ru> (дата обращения: 17.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-137-148.
21. Ilankeeran P.K., Mohite P.M., Kamle S. Axial Tensile Testing of Single Fibres // *Modern Mechanical Engineering*. 2012. Vol. 2. P. 151–156. DOI: 10.4236/mme.2012.24020.
22. Agrawal M., Prabhakaran R.T.D. Effect of Fiber Sizing on Mechanical Properties of Carbon Reinforced Composites: A Review // *Organic Polymer Material Research*. 2019. Vol. 1. No. 2. P. 1–5. DOI: 10.30564/opmr.v1i2.1683

23. Norris R.E., Ennis B.L., Clarke R.J. et al. Initial assessment of alternative carbon fiber geometries for design of cost-effective compressive performance: Size effect studies // *Composites Part B*. 2025. Vol. 296. Art. 112181.
24. Программа расчета геометрических параметров углеродного волокна / НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023683908 от 10.11.2023.
25. Kumar R., Mikkelsen L.P., Lilholt H., Madsen B. Understanding the mechanical response of glass and carbon fibres: stress-strain analysis and modulus determination // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 942. Art. 012033. DOI: 10.1088/1757-899X/942/1/012033.
26. Curtis G.J., Milne J.M., Reynolds W.N. Non-hookean behaviour of strong carbon fibres // *Nature*. 1968. Vol. 220. P. 1024–1025.

References

1. Mallick P.K. *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. 3rd ed. CRC Press, 2007, 632 p.
2. Gulyaev I.N., Klimenko O.N., Lonskii S.L., Slavin A.V., Chervas L.V. Determination of the composition and structure of polymer composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 4 (81), pp. 32–47. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 17, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-4-32-47.
3. Zhelezina G.F., Kulagina G.S., Sidorina A.I., Soloveva N.A. Fatigue of constructional organoplastics. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 1, pp. 89–100. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 17, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-89-100.
4. Shershak P.V., Yakovlev N.O., Shokin G.I., Kutsevich K.E., Popkova E.A. Evaluation method and factors influencing the bonding quality between face and honey-comb cores in floor and interior aircraft panels. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 81–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-81-88.
5. Gulyaev A.I., Yakovlev N.O., Krylov V.D., Lashov O.A. Application of fractographic analysis in the study of interlayer fracture of PCM. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 3 (48), pp. 65–73. DOI: 10.18577/9140-2071-2017-0-3-65-73.
6. Chand S. Review: Carbon fibers for composites. *Journal of Materials Science*, 2000, vol. 35, p. 1303–1313. DOI: 10.1023/A:1004780301489.
7. Hari Krishnan R., Mohite P.M., Upadhyay C.S. Generalized Weibull model-based statistical tensile strength of carbon fibres. *Archive of Applied Mechanics*, 2018, vol. 88, pp. 1617–1636. DOI: 10.1007/s00419-018-1391-9.
8. Chevallier A., Boutenel F., Guicheret V. et al. Single fibre tensile testing: analysing the influence of fibre misalignment. *21st European Conference on Composite Materials*. Nantes, France, 2024, art. hal-04738979.
9. Li Q., Woodhead A.L., Church J.S., Naebe M. On the detection of carbon fibre storage contamination and its effect on the fibre–matrix interface. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, art. 16446. DOI: 10.1038/s41598-018-34609-y.
10. Sutubalov A.I., Podzhivotov N.Yu., Shershak P.V., Yakovlev N.O. Evaluation of homogeneity of physical and mechanical properties of semi-finished products for aviation purpose. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), pp. 121–135. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 17, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-121-135.
11. Huang X. Fabrication and Properties of Carbon Fibers. *Materials*, 2009, vol. 2, pp. 2369–2403. DOI: 10.3390/ma2042369.
12. Nacharkina A.V., Zelenina I.V., Valueva M.I., Voronina O.G. Influence of additional sizing of carbon fiber in producing volume-reinforced preforms on the properties of high-temperature carbon fiber. *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), pp. 54–65. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 17, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-54-65.
13. *Sizing agent for carbon fiber, carbon fiber, carbon fiber-reinforced composite material, and method of producing carbon fiber-reinforced composite material*: pat. WO 2015/049567 A1; appl. 30.09.14; publ. 09.04.15.

14. Sizing agent for carbon fiber, method for sizing carbon fiber by said sizing agent, sized carbon fiber and knitted or woven fabric using said carbon fiber: pat. US 7135516 B2; appl. 30.07.02; publ. 14.11.06.
15. Beider E.Ya., Petrova G.N., Izotova T.F. An influence of coupling agent on properties of thermoplastic glass reinforced plastics. *Trudy VIAM*, 2014, no. 9, pp. 47–52. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: April 17, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-7-7.
16. Shenghe Tech. Carbon Fiber Storage Life and Handling Requirements. Available at: <https://shenghetech.com/info-detail/carbon-fiber-storage-life-and-handling-requirements> (accessed: March 02, 2026)
17. Zhang S., Gu H., Zhao M. et al. Effect of sizing agents on tensile properties of carbon fiber filament wound structures. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2024, vol. 19, pp. 1–8. DOI: 10.1177/15589250231183159.
18. Yang T., Zhao Y., Liu H. et al. Effect of sizing agents on surface properties of carbon fibers and interfacial adhesion of carbon fiber/bismaleimide composites. *ACS Omega*, 2021, vol. 6, pp. 23028–23037. DOI: 10.1021/acsomega.1c01103.
19. Volkova O.Yu., Tatus N.A. Modern methods for determining fiber characteristics. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2025, no. 177, pp. 3–14. Available at: <http://www.vntr.ru> (accessed: February 25, 2026). DOI: 10.18411/vntr2025-177-1.
20. Erasov V.S., Sibayev I.G., Sutubalov A.I., Popkova E.A., Gorbovets M.A. Methods of mechanical testing to determine the strength of carbon fibers. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), pp. 137–148. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 17, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-137-148.
21. Ilankeeran P.K., Mohite P.M., Kamle S. Axial Tensile Testing of Single Fibres. *Modern Mechanical Engineering*, 2012, vol. 2, pp. 151–156. DOI: 10.4236/mme.2012.24020.
22. Agrawal M., Prabhakaran R.T.D. Effect of Fiber Sizing on Mechanical Properties of Carbon Reinforced Composites: A Review. *Organic Polymer Material Research*, 2019, vol. 1, no. 2, pp. 1–5. DOI: 10.30564/opmr.v1i2.1683
23. Norris R.E., Ennis B.L., Clarke R.J. et al. Initial assessment of alternative carbon fiber geometries for design of cost-effective compressive performance: Size effect studies. *Composites Part B*, 2025, vol. 296, art. 112181.
24. *Program for calculating the geometric parameters of carbon fiber*: certificate of state registration of the computer program No. 2023683908 dated November 10, 2023.
25. Kumar R., Mikkelsen L.P., Lilholt H., Madsen B. Understanding the mechanical response of glass and carbon fibres: stress–strain analysis and modulus determination. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 942, art. 012033. DOI: 10.1088/1757-899X/942/1/012033.
26. Curtis G.J., Milne J.M., Reynolds W.N. Non-hookean behaviour of strong carbon fibres. *Nature*, 1968, vol. 220, pp. 1024–1025.

Информация об авторах

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

Котлярова Маргарита Романовна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Дашкин Артем Рафикович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Яковлев Николай Олегович, заместитель начальника Испытательного центра, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Aleksandr I. Sutubalov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Margarita R. Kotlyarova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Artem R. Dashkin, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 05.05.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 15.05.2026.
The article was submitted 05.05.2026; approved and accepted for publication after reviewing 15.05.2026.