

Известия Алтайского государственного университета. 2025. № 1 (141). С. 48–57.
Izvestiya of Altai State University. 2025. No 1 (141). P. 48–57.

Научная статья

УДК 004.43:678(045), 53.08

DOI: 10.14258/izvasu(2025)1-06

Сравнительные механические испытания однонаправленных полимерных композиционных материалов

Павел Андреевич Медведев¹, Алексей Николаевич Блазнов²,

Егор Германович Сакошев³, Захар Германович Сакошев⁴,

Вячеслав Викторович Фирсов⁵, Арсений Александрович Кораблин⁶

¹Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН,
Бийск, Россия, mailpavel88@mail.ru

²Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН;
Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного
технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия,
blaznov74@mail.ru

³Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН,
Бийск, Россия, labmineral@mail.ru

⁴Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН,
Бийск, Россия, fak1_00@mail.ru

⁵Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН,
Бийск, Россия, ferzis@mail.ru

⁶Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН;
Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного
технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия,
labmineral@mail.ru

Original article

Comparative Mechanical Testing of Unidirectional Polymer Composite Materials

Pavel A. Medvedev¹, Aleksey N. Blaznov², Egor G. Sakoshev³,

Zakhar G. Sakoshev⁴, Vyacheslav V. Firsov⁵, Arseniy A. Korablin⁶

¹Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk, Russia,
mailpavel88@mail.ru

²Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS;
Biysk Technological Institute, Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russia,
blaznov74@mail.ru

³Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk, Russia,
labmineral@mail.ru

⁴Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk, Russia,
fak1_00@mail.ru

⁵Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk, Russia,
ferzis@mail.ru

⁶Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS;
Biysk Technological Institute, Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russia,
labmineral@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты сравнительных испытаний односторонних базальтопластиков, проведенных тремя разными методами. Выявлены достоинства и недостатки для каждого способа, проведен сравнительный анализ полученных экспериментальных данных. Оценивались прочность, модуль Юнга, предельная деформация при разрушении. Наиболее точные значения прочностных характеристик ($\sigma=1571$ МПа, $E=42363$ МПа) получены для образцов, изготовленных по патенту РФ № 2597811. Данные значения являются наиболее приближенными к расчетно-теоретическим, полученным исходя из соотношения компонентов по правилу смесей. Коэффициент реализации характеристик армирующего наполнителя и связующего при изготовлении односторонних образцов в лабораторных условиях составил 0,7 по прочности и 0,85 по модулю Юнга от теоретических расчетных значений. Результаты испытаний кольцевых образцов по ГОСТ 25.603–82 показывают разбросы свойств практически в два раза (прочность от 500 до 1076 МПа, модуль Юнга не определялся в связи со сложностью метода), а образцы, изготовленные по ГОСТ 33349–2015, имеют неравномерную толщину по длине образца и нестабильные прочностные показатели ($\sigma=1130$ МПа, $E=33052$ МПа), ниже, чем по патенту РФ № 2597811.

Ключевые слова: методы испытаний, полимерные композиционные материалы, односторонний базальтопластик, модуль упругости, прочность

Для цитирования: Медведев П.А., Блазнов А.Н., Сакошев Е.Г., Сакошев З.Г., Фирсов В.В., Кораблин А.А. Сравнительные механические испытания односторонних полимерных композиционных материалов // Известия Алтайского государственного университета. 2025. № 1 (141). С. 48–57. DOI: 10.14258/izvasu(2025)1-06

Финансирование: исследования выполнены в рамках госзадания (код научной темы FUGE-2024-0008, № госрегистрации темы 124021200031-4) при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

Введение

Разработанная технология получения полимерных композиционных материалов (далее ПКМ) является одним из наиболее важных достижений второй половины XX в. В последнее время объем выпуска композиционных материалов на полимерной основе приблизился уже к миллионам тонн. Стеклопластики, базальтопластики, углепластики и другие виды композитов находят применение во всех сферах экономики промышленно развитых стран [1].

Одним из главных этапов разработки композиционных материалов является сертификация его эксплуатационных характеристик, а также провер-

Abstract. The paper presents the results of comparative tests of unidirectional basalt plastics. All tests are performed using three different methods, with their advantages and disadvantages being identified. A comparative analysis of the obtained experimental data is carried out including the assessment of strength, Young's modulus, and ultimate fracture strain. The most accurate values of strength characteristics ($\sigma=1571$ MPa, $E=42363$ MPa) are obtained for samples manufactured by following the RF patent No. 2597811. These values are the closest to the theoretical ones calculated using the mixture rule and proper ratio of components. The implementation coefficients for characteristics of a reinforced filler and a binder of unidirectional samples produced in laboratory conditions are 0.7 for strength and 0.85 for Young's modulus, calculated theoretically.

Test results for the GOST 25.603–82 ring samples show almost twofold spread of obtained characteristics (strength varies from 500 to 1076 MPa, Young's modulus cannot be determined due to the method complexity). The GOST 33349–2015 samples have uneven thickness along their length and demonstrate unstable strength characteristics ($\sigma=1130$ MPa, $E=33052$ MPa). They are lower than the characteristics of the RF patent No. 2597811 samples.

Keywords: test methods, polymer composite materials, unidirectional basalt plastic, elastic modulus, strength

For citation: Medvedev P.A., Blaznov A.N., Sakoshev E.G., Sakoshev Z.G., Firsov V.V., Korablin A.A. Comparative Mechanical Testing of Unidirectional Polymer Composite Materials. *Izvestiya of Altai State University*. 2025. No 1 (141). P. 48–57. (In Russ.). DOI: 10.14258/izvasu(2025)1-06

Funding: the research was carried out within the framework of the state assignment FUGE-2024-0008 (Theme Registration ID: 124021200031-4) with lab equipment provided by the Biysk Regional Center for Shared Use of Scientific Equipment of the SB RAS (IPCET B RAS, Biysk).

ка на потребительскую пригодность. С этой целью полученные материалы подлежат различного рода испытаниям в зависимости от их целевого назначения [2]. Подбор оптимальных методов исследования позволяет исключить влияние внешних факторов при определении механических характеристик. На основании результатов испытаний образцов ПКМ можно спрогнозировать их свойства в зависимости от схемы армирования (спиральная намотка, продольно-поперечная намотка, косослойная продольно-поперечная намотка и т.д.) [1]. Наиболее распространенные методы испытаний ПКМ на растяжение, изгиб и сжатие обобщены и описаны ра-

нее в монографии [2]. Отмечены достоинства и недостатки известных стандартизованных методов испытаний [2–5]. Однонаправленные образцы композиционных материалов — таких как стекло-базальтопластики, углепластики, обладают чрезвычайно высокими характеристиками вдоль направления армирования (прочность однонаправленного стеклопластика до 2000 МПа превышает прочность высокопрочных марок сталей), но при этом обладают низкой сдвиговой прочностью, примерно в 50 раз меньшей, чем вдоль волокон, вследствие высокой анизотропии свойств. Сдвиговая прочность однонаправленных композитов определяется прочностью матрицы — эпоксидного связующего. Этим обусловлены проблемы испытаний однонаправленных образцов ПКМ по стандартным методам: образцы разрушаются в захватах от действия сдвиговых и раскалывающих напряжений, или в местах перехода композита к металлическим захватам (при растяжении), либо в местах контакта с металлическим нажимным наконечником (при трехточечном изгибе) вследствие контактных напряжений [6–9]. В качестве перспективного метода испытаний, лишенного перечисленных недостатков стандартных методов, предложен и запатентован метод продольного изгиба [2, 10, 11].

Упруго-прочностные свойства композитного материала можно определять расчетным способом по известным значениям механических характеристик входящих в него армирующего материала и полимерной матрицы [2, 12–14]. Для простых по структуре композитов, к которым относятся однонаправленно армированные стекло- и базальтопластики, модуль упругости E с высокой степенью достоверности рассчитывают по известному правилу смесей:

$$E = E_A \cdot \varphi_A + E_M \cdot (1 - \varphi_A), \quad (1)$$

где E_A — модуль упругости армирующего материала; E_M — модуль упругости материала полимерной матрицы; φ_A — относительное (по объему) содержание армирующих волокон в композите.

Высоконаполненные однонаправленно армированные композиты обладают свойством линейной упругости вплоть до того момента, когда в них появляются признаки макроразрушения [8, 15–17], поэтому с достаточной для инженерной практики точностью их считают линейно-упругими телами [2].

Учитывая практическую линейную упругость однонаправленных композиционных материалов, прочностной потенциал их можно оценивать по значениям зависящим от содержания армирующих волокон (φ_A) модуля упругости и по значениям не зависящим от φ_A предельной деформации для армирующих волокон. Такая оценка может быть сделана по формуле

$$\sigma_b = (E_A \cdot \varphi_A + E_M \cdot (1 - \varphi_A)) \cdot \varepsilon_A, \quad (2)$$

где σ_b — предел прочности однонаправленного композита; ε_A — предельное значение деформации для волокон армирующего материала.

Произведем расчеты для следующих исходных данных. У базальтовых волокон, согласно литературным данным, $E_A \approx 80$ ГПа, а предельная деформация волокон $\varepsilon_A \approx 0,048$ [12, 13]. Эпоксидные связующие, применяемые при изготовлении композитных материалов, по литературным данным, имеют модуль упругости $E_M \approx 3,5$ ГПа [12, 13]. Для среднего относительного объемного содержания наполнителя 0,6 современных высокопрочных базальтопластиков расчеты по формулам (1) и (2) дают соответственно значения модуля 49,4 ГПа, прочности 2300 МПа.

Расчетные теоретические значения механических свойств могут быть использованы как критерии оценки качества метода испытаний, которые показывают, насколько близкие значения к теоретическим дает тот или иной метод. Следовательно, наилучшим будет считаться такой метод испытаний, для которого экспериментальные значения прочности и модуля будут иметь наименьшее отклонение от расчетных при минимальном разбросе результатов экспериментов.

Известными стандартизованными методами определения упруго-прочностных свойств однонаправленных композитов являются: растяжение кольцевых образцов из ПКМ самозамыкающимися полудисками по ГОСТ 25.603-82 [18]; изготовление и испытание плоских образцов ПКМ по ГОСТ 33349-2015 [19].

Цель работы: провести сравнительный анализ известных методов испытаний однонаправленно армированных образцов ПКМ, определить наиболее точные, т.е. приближенные к теоретическим значения механических характеристик — показатели прочности и модуля Юнга.

Материалы и методы исследований

Армирующим материалом для изготовления однонаправленных образцов композитов в настоящей работе выбран базальтовый ровинг марки BCF17-2520-KB12. Полимерная матрица содержит в своем составе эпоксидную смолу марки ЭД-20, отвердитель ИМТГФА, ускоритель УП 606/2.

Первый исследуемый метод по ГОСТ 25.603-82 подразумевает кратковременное растяжение самозамыкающимися полудисками кольцевых образцов из композиционных материалов, изготовленных способом однонаправленной намотки на цилиндрическую оправку. Размеры изготовленных однонаправленных кольцевых образцов базальтопластика: внутренний диаметр $100 \pm 0,5$ мм; толщина $4 \pm 0,5$ мм; ширина $10 \pm 0,5$ мм (рис. 1).



Рис. 1. Кольцевые образцы базальтопластика

Испытания данных образцов проводились на оборудовании, в котором обеспечивается постоянная скорость перемещения подвижного захвата (рис. 2).

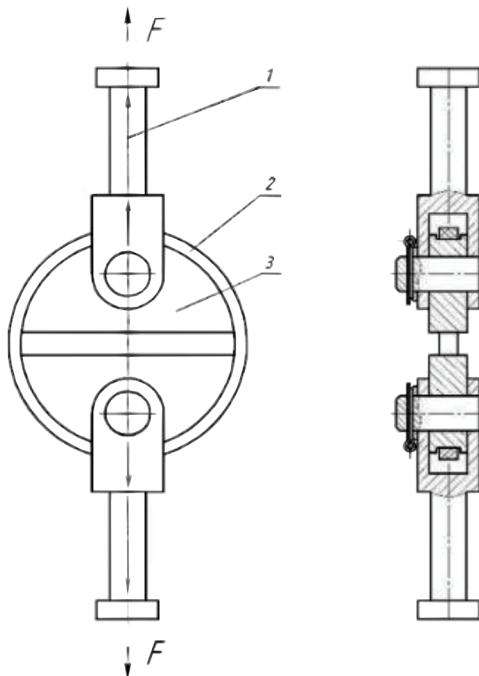


Рис. 2. Приспособление для испытания колец на растяжение: 1 — тяга, 2 — кольцо; 3 — втулка

Согласно ГОСТ 25.603-82, в результате испытаний фиксируют силу F_{\max} , при которой произошло разрушение колец, и рассчитывают значение прочности, модуля упругости по следующим формулам [18].

Предел прочности в окружном направлении при растяжении σ_{θ_B} , МПа вычисляют по формуле:

$$\sigma_{\theta_B} = \frac{F_{\max}}{S_1 + S_2}, \quad (3)$$

где F_{\max} — разрушающая нагрузка, Н; $S_1 + S_2$ — начальная площадь поперечных сечений образца у разъема полудисков, мм^2 .

Модуль упругости в окружном направлении при растяжении E_θ , МПа вычисляют по формуле:

$$E_\theta = \frac{\Delta\sigma_\theta}{\Delta\varepsilon_\theta} = \frac{\Delta F}{2S\Delta\varepsilon_\theta}, \quad (4)$$

где ΔF — приращение нагрузки, Н; $\Delta\varepsilon_\theta = \frac{\Delta l}{l}$ — приращение относительной деформации в окружном направлении при изменении нагрузки на ΔF ; l — начальная длина измерительной базы, мм; Δl — приращение начальной длины измерительной базы при изменении нагрузки ΔF , мм.

Приращение начальной длины измерительной базы осуществляют с помощью тензорезисторов или других измерителей деформации.

ГОСТ 33349-2015 предусматривает одностороннюю намотку ровинга, пропитанного связующим,

на специальную оправку-кассету в несколько последовательных слоев. После отверждения на оправке вырезают образцы для испытаний в виде плоских прямоугольных пластин (рис. 3).

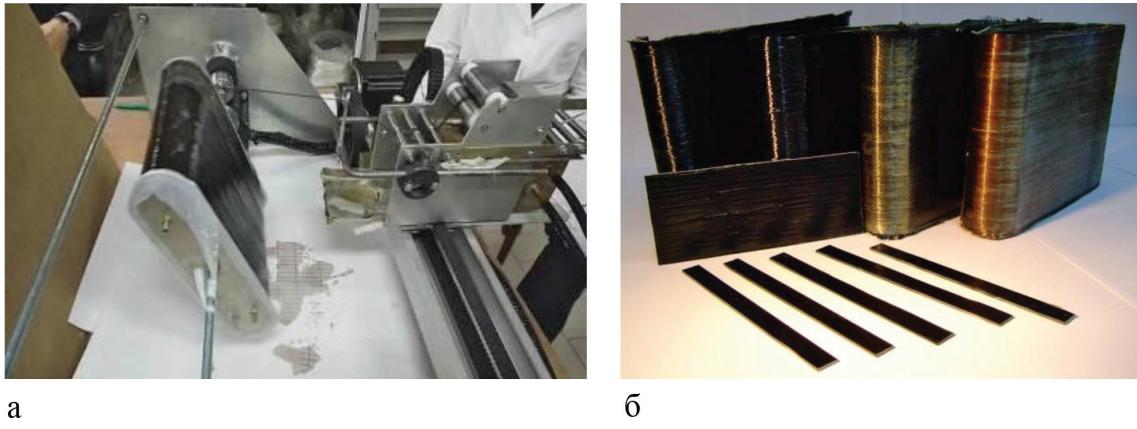


Рис. 3. Изготовление пластин намоткой по ГОСТ 33349-2015 (а) и образцов для испытаний (б)

Третий метод исследования механических характеристик является авторским оригинальным техническим решением по патенту 2597811 [20]. Сущность метода заключается в формировании на оправке цилиндрического изделия с требуемым расположением армирующего материала (в нашем случае односторонняя плотная намотка виток к витку), разрезке его вдоль оси (рис. 4а) с последующей разверткой на плоскость, подпрессовкой образца в плос-

кой форме и отверждением. Для проведения испытаний из отверженного листа вырезают в продольном или поперечном направлении образцы в виде пластин (или лопаток) с необходимыми для каждого метода испытаний размерами с толщиной, равной толщине листа (рис. 4б). Данные образцы могут быть испытаны известными и стандартизованными методами на растяжение, изгиб, сжатие, предпочтительно методом продольного изгиба.

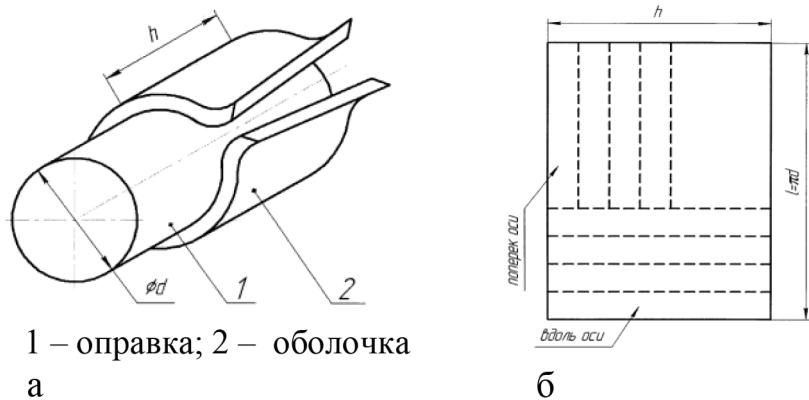


Рис. 4. Изготовление образцов по патенту 2597811 (а) и раскрой листа (б): а — 1 — оправка; 2 — оболочка

Данный метод был реализован на практике [21] и успешно применялся для изготовления и исследований гибридных композиционных материалов [22] ПКМ с различными схемами армирования [23], односторонне армированных образцов композиционных материалов с применением минеральных, химических и растительных волокон [24].

Односторонние образцы в виде прямоугольных пластин размерами 2x10x100 мм, изготовленные

намоткой по второму и третьему способу, испытывали методом продольного изгиба, ранее описанным в работах [2, 10, 11]. Сущность испытаний заключается в продольном изгибе шарнирно опретого образца вплоть до разрушения, с регистрацией осевой силы P (продольной нагрузки) и соответствующего значения взаимного перемещения (сближения) концов образца Δ (рис. 5).



Рис. 5. Процесс испытаний образцов базальтопластика на продольный изгиб

Прогиб образца в средней части f определяют непосредственно измерением в процессе испытаний или косвенно по значениям сближения концов Δ , по форме изогнутой линии стержня. Определяют значения прочности σ , модуля Юнга E и предельной деформации ε по расчетным зависимостям, подробный вывод которых описан в монографии [2]:

$$\sigma = \frac{P \cdot f}{w} \pm \frac{P}{F}, \quad (5)$$

$$\varepsilon = \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{\rho}, \quad (6)$$

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}, \quad (7)$$

где P — приложенная к концам образца продольная нагрузка (реакция шарнирных опор), Н; f — стрела

прогиба образца при продольном изгибе, мм; w — момент сопротивления поперечного сечения образца, мм³; F — площадь поперечного сечения образца, мм²; d — диаметр для образцов круглого сечения или толщина для образцов прямоугольного сечения, мм; ρ — радиус кривизны изогнутой линии в средней части, в месте наибольшего прогиба образца, мм.

Как показали расчеты и измерения, составляющая напряжения в выражении (5), обусловленная растяжением/сжатием, занимает около 1,0–1,5 % от прочности, поэтому влиянием растяжения/сжатия при испытаниях на продольный изгиб можно пренебречь.

Полученные результаты и их обсуждение

На рисунке 6 показаны типичные диаграммы нагрузки кольцевых образцов базальтопластиков по ГОСТ 25.603-82.

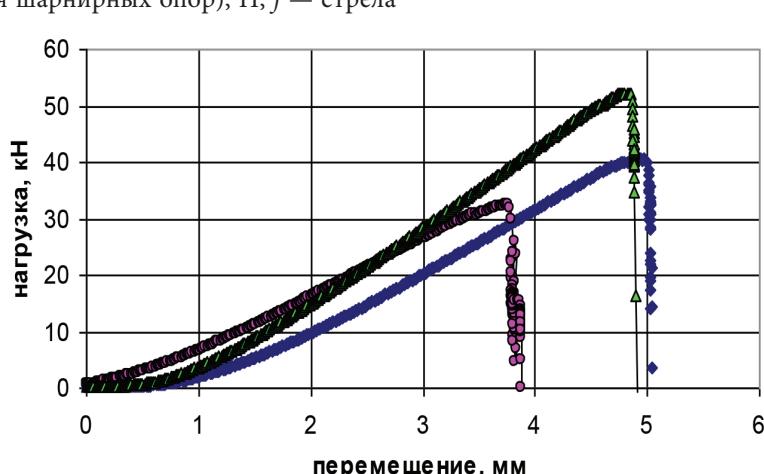


Рис. 6. График зависимостей нагрузки от перемещения для испытаний кольцевых образцов по ГОСТ 25.603-82, проведенных в г. Бийске

В целях сравнения ниже приведена таблица 1 с результатами испытаний однона правленных колец базальтопластика от той же партии, проведенных в г. Новосибирске на другом приспособлении.

Как видно из полученных данных, результаты испытания на разных приспособлениях одинаковых кольцевых образцов могут отличаться в 1,5–2 раза.

Таблица 1

Результаты испытаний на растяжение колец в г. Новосибирске

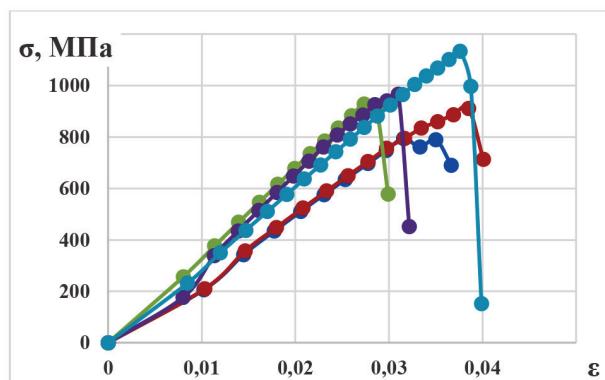
№ образца	h, мм	b, мм	S, мм ²	F _{max} , кН	σ_{θ} , МПа
1	3,7	10,25	37,92	79,48	1048
2	3,6	10,20	36,72	72,19	983
3	3,6	10,20	36,72	88,32	1203
4	4,0	10,30	41,20	84,29	1023
5	3,8	10,20	38,76	87,17	1124
Среднее значение					1076

Примечание: h — толщина кольца; b — ширина кольца; S — площадь сечения; F_{max} — разрушающая сила; σ_{θ} — предел прочности в окружном направлении.

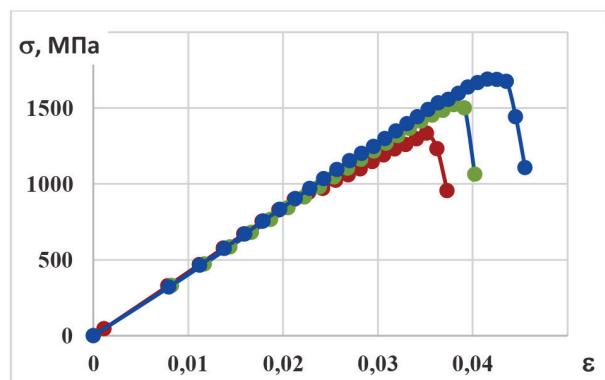
Таким образом, значения предела прочности σ_{θ} составили от 434 до 697 МПа на приспособлении в г. Бийске и от 983 до 1202 МПа на другом оборудовании в г. Новосибирске. При проведении испытаний на разных приспособлениях отмечена взаимосвязь разброса результатов испытаний с качеством изготовленных полудисков (заусенцы, радиусы и т.д.). Все разрушения образцов произошли в месте размыкания полудисков вследствие «перекусывания» их краями. Отмечена сложность определения модуля упругости данным методом (для точного определения деформации нужны специальные тензометрические датчики, что усложняет процесс измерений).

На рисунке 7 представлены диаграммы зависимости напряжений от деформации, полученные методом продольного изгиба для соответствующего способа изготовления образцов.

При раскрытии отверженного композита в приспособлении по ГОСТ 33349-2015 выявлено неравномерное распределение материала из-за прогиба оправки при прессовании. Прежде всего это выражено в неравномерных значениях толщины на разных участках образца. Средние показатели механических характеристик при испытаниях данных образцов составили: предел прочности $\sigma=1130$ МПа, модуль Юнга $E=33052$ МПа (рис. 7а).



а



б

Рис. 7. Диаграммы нагружений на продольный изгиб образцов, изготовленных по ГОСТ 33349-2015 (а) и по патенту РФ № 2597811 (б)

В таблице 2 представлены результаты сравнительных испытаний образцов однона правленных базальтопластиков, изготовленных на одном ро-

винге и одинаковом связующем тремя разными способами.

Таблица 2

Результаты испытаний однонаправленных образцов базальтопластика

Способ изготовления образцов	ГОСТ 25.603-82		ГОСТ 33349-2015		Патент РФ № 2597811	
	E, МПа	σ , МПа	E, МПа	σ , МПа	E, МПа	σ , МПа
Средние значения	-	500–1076	33052	1130	42363	1571

Наибольшие значения прочности и модуля Юнга, полученные при испытаниях однонаправленных базальтопластиков, изготовленных по патенту № 2597811, наиболее приближены к расчетным теоретическим значениям, но ниже их. Это можно объяснить несовершенством изготовления однонаправленных образцов в лабораторных условиях, неравномерностью натяжения всех волокон. Для оценки влияния технологических параметров на расчетные прочностные характеристики в правило смесей (1), (2) вводят коэффициент k , который отражает несовершенство технологии. В нашем случае коэффициент k наилучшего реализованного способа изготовления однонаправленных образцов в лабораторных условиях составил 0,7 по прочности и 0,85 по модулю Юнга.

Заключение

Проведены сравнительные испытания однонаправленных базальтопластиков, изготовленных тремя разными способами. Экспериментальные данные показывают, что наименьшие результаты по прочности ($\sigma=500–1076$ МПа) получены методом испытаний

кольцевых образцов по ГОСТ 25.603-82. К основным его недостаткам можно отнести: разброс значений в 1,5–2 раза на разных испытательных стендах; кольцо разрушается в месте контакта с металлическими полудисками, сложность определения модуля Юнга.

Испытания, проведенные по ГОСТ 33349-2015, имеют результаты $\sigma=1130$ МПа, $E=33052$ МПа. К выявленным недостаткам данного метода относятся: циклическое изменение силы натяжения в процессе намотки при повороте оправки (кассеты) в виде пластины; разная толщина образцов вследствие прогиба оправки при подпрессовке.

Наиболее высокие значения характеристик получены для однонаправленных базальтопластиков, изготовленных по патенту РФ № 2597811: $\sigma=1571$ МПа, $E=42363$ МПа. Данные значения являются наиболее близкими к расчетным, полученным по правилу смесей. Полученные результаты могут быть полезны при подборе метода исследования прочностных характеристик разнообразных видов однонаправленных композитов с различными волокнами и связующими.

Библиографический список

1. Русских Г.И., Башара В.А., Блазнов А.Н. Технология непрерывного формования стеклопластиков : монография. Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2016. 178 с.
2. Блазнов А.Н., Савин В.Ф., Волков Ю.П. и др. Методы механических испытаний композиционных стержней : монография / под ред. А.Н. Блазнова, В.Ф. Савина. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2011. 314 с.
3. Kulakov V.L., Tarnopol'skii Y.M., Arnautov A.K., et al. Stress-Strain State in the Zone of Load Transfer in a Composite Specimen under Uniaxial Tension // Mechanics of Composite Materials. 2004. Vol. 40. P. 91–100.
4. Portnov G.G., Kulakov V.L., Arnautov A.K. A Refined Stress-Strain Analysis in the Load Transfer Zone of Flat Specimens of High-Strength Unidirectional Composites in Uniaxial Tension. 1. Theoretical Analysis // Mechanics of Composite Materials. 2006. Vol. 42. P. 547–554.
5. Huang B., Ma M., Liu X., et al. Investigation on the Fundamental Mechanical Properties and Probabilistic Characteristics of Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite Plates // Polymer Testing. 2024. Vol. 131. P. 108355. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2024.108355
6. Kumar R., Mikkelsen L.P., Lilholt H., et al. Experimental Method for Tensile Testing of Unidirectional Carbon Fibre Composites Using Improved Specimen Type and Data Analysis // Materials. 2021. Vol. 14. 3939. DOI: 10.3390/ma14143939
7. Vankar S.R., Kaore A.N., Yerramalli C.S. Methodology for Testing the Compressive Strength of Pultruded Composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2023. Vol. 42. Is. 11–12. P. 544–557. DOI: 10.1177/07316844221133293
8. Talreja R. Failure of Unidirectional Fiber Reinforced Composites: A Case Study in Strength of Materials // Mechanics of Composite Materials. 2023. Vol. 59. P. 173–192. DOI: 10.1007/s11029-023-10091-0
9. Ощепков М.Ю. Однонаправленные стеклопластики. Ч. 3. Высокая степень армирования // Композитный мир. 2020. № 2 (89) С. 38–47.
10. Старцев О.В., Блазнов А.Н., Волков Ю.П. и др. Повышение точности определения механических показателей полимерных композиционных материалов. 4. Продольный изгиб // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. № 4. С. 52–63.
11. Патент № 2451281 РФ. Способ определения механических характеристик стержней из полимерных компози-

- ционных материалов и устройство для его реализации (варианты) / А.Я. Рудольф, С.П. Поздеев, В.Ф. Савин и др. Заявка № 2010139689/28 от 27.09.2010; опубл. 20.05.2012. Бюл. № 14. 12 с.: ил.
12. Промышленные полимерные композиционные материалы / под ред. М. Ричардсона; пер. с англ. под ред. П.Г. Бабаевского. М.: Химия, 1980. 472 с.: ил.
13. Справочник по композиционным материалам. В 2-х кн. / пер. с англ. под ред. Дж. Любина. М.: Машиностроение, 1988. Кн. 1. 448 с., Кн. 2. 581 с.: ил.
14. Андреевская Г.Д. Высокопрочные ориентированные стеклопластики. М.: Наука, 1966. 371 с.: ил.
15. Тарнопольский Ю.М., Скудра А.М. Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков. Рига: Зинатне, 1966. 260 с.
16. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков; 3-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1981. 272 с.: ил.
17. Пустовойтов В.П., Килимов С.Л., Черномаз В.С. Стеклопластики в строительстве / под ред. В.А. Телешова. М.: Стройиздат, 1978. 212 с.
18. ГОСТ 25.603-82 Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на растяжение кольцевых образцов при нормальной, повышенной и пониженной температурах. М.: Межгосударственный стандарт, 1984. 12 с.
19. ГОСТ 33349-2015 Композиты полимерные. Производство пластиин намоткой для изготовления образцов для испытаний. М.: Стандартинформ, 2015. 20 с.
20. Патент № 2597811 РФ. Способ определения механических характеристик полых трубчатых изделий из полимерных композиционных материалов / В.В. Самойленко, А.Н. Блазнов, В.В. Фирсов и др. Заявка № 2015128703 от 14.07.2015; опубл. 20.09.2016. Бюл. № 26.
21. Самойленко В.В. Разработка системы программного управления изготовлением намоточных изделий из полимерных композиционных материалов // Ползуновский вестник. 2016. № 4. Т. 1. С. 225–228.
22. Журковский М.Е., Сакошев З.Г., Блазнов А.Н. и др. Исследование механических свойств намоточных гибридных полимерных композиционных материалов // Южно-Сибирский научный вестник. 2018. № 3 (23). С. 39–43. DOI: 10.25699/SSSB.2018.23.17555
23. Блазнов А.Н., Сакошев З.Г., Журковский М.Е. и др. Разработка программ управления установкой намотки и исследование ПКМ с различными схемами армирования // Южно-Сибирский научный вестник. 2019. № 4. Т. 2. С. 13–18. DOI: 10.25699/SSSB.2019.28.48965
24. Медведев П.А., Блазнов А.Н., Сакошев Е.Г. и др. Автоматизация процессов изготовления и испытания пластиин из полимерных композиционных материалов // Южно-Сибирский научный вестник. 2024. № 2. С. 166–172. DOI: 10.25699/SSSB.2024.54.2.022

References

1. Russkikh G.I., Bashara V.A., Blaznov A.N. *Technology of Continuous Molding of Fiberglass: Monograph*; Alt. State Tech. University, BTI. Biysk: Alt. Publishing House. State Tech. Univ., 2016. 178 p. (In Russ.).
2. Blaznov A.N., Savin V.F., Volkov Yu.P. et al. *Methods of Mechanical Testing of Composite Rods: Monograph*; Edited by A.N. Blaznov, V.F. Savin. Biysk: Alt. Publishing House. State Tech. University, 2011. 314 p. (In Russ.).
3. Kulakov V.L., Tarnopol'skii Y.M., Arnautov A.K. et al. Stress-Strain State in The Zone of Load Transfer in a Composite Specimen under Uniaxial Tension. *Mechanics of Composite Materials*. 2004. Vol. 40. P. 91–100.
4. Portnov G.G., Kulakov V.L., Arnautov A.K. A Refined Stress-Strain Analysis in the Load Transfer Zone of Flat Specimens of High-Strength Unidirectional Composites in Uniaxial Tension. 1. Theoretical Analysis. *Mechanics of Composite Materials*. 2006. Vol. 42. P. 547–554.
5. Huang B., Ma M., Liu X., et al. Investigation on the Fundamental Mechanical Properties and Probabilistic Characteristics of Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite Plates. *Polymer Testing*. 2024. Vol. 131. P. 108355. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2024.108355
6. Kumar R., Mikkelsen L.P., Lilholt H., et al. Experimental Method for Tensile Testing of Unidirectional Carbon Fibre Composites Using Improved Specimen Type and Data Analysis. *Materials*. 2021. Vol. 14. 3939. DOI: 10.3390/ma14143939
7. Vankar S.R., Kaore A.N., Yerramalli C.S. Methodology for Testing the Compressive Strength of Pultruded Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2023. Vol. 42. Is. 11–12. P. 544–557. DOI: 10.1177/07316844221133293
8. Talreja R. Failure of Unidirectional Fiber Reinforced Composites: A Case Study in Strength of Materials. *Mechanics of Composite Materials*. 2023. Vol. 59. P. 173–192. DOI: 10.1007/s11029-023-10091-0
9. Oshchepkov M.Yu. Unidirectional Fiberglass. Part 3. High Degree of Armament. *Composite World*. 2020. No 2 (89). P. 38–47. (In Russ.).
10. Startsev O.V., Blaznov A.N., Volkov Yu.P. et al. Increasing the Accuracy of Determining the Mechanical Parameters of Polymer Composite Materials. 4. Longitudinal Bending. *All Materials. Encyclopedic Reference Book*. 2016. No 4. P. 52–63. (In Russ.).
11. RU Patent No 2451281, MPK G01N. A Method for the Determination of Mechanical Characteristics of Bars Made of Polymer Composite Materials and a Device to Implement the Same (Variants) / A.Ya. Rudolf, S.P. Pozdeyev, V.F. Savin, et al. No 2010139689/28; Applied. 27.09.2010; Published 20.05.2012; Bull. No 14. 12 p.: Illustrated. (In Russ.).
12. *Industrial Polymer Composite Materials*. Ed. M. Richardson; Lane from English Edited by P.G. Babaevsky. M.: Chemistry, 1980. 472 p.: ill. (In Russ.).

13. *Handbook of Composite Materials*. In 2 books; Lane from English Edited by J. Lubina. M.: Mechanical Engineering, 1988. Book. 1. 448 p., Book. 2. 581 p.: ill. (In Russ.).
14. Andreevskaya G.D. *High-Strength Oriented Fiberglass*. M.: Nauka, 1966. 371 p.: ill. (In Russ.).
15. Tarnopolsky Yu.M., Skudra A.M. *Structural Strength and Deformability of Fiberglass Plastics*. Riga: Zinatne, 1966. 260 p. (In Russ.).
16. Tarnopolsky Yu.M., Kintsis T.Ya. *Methods of Static Testing of Reinforced Plastics*. 3rd Ed., Revised. and Additional M.: Chemistry, 1981. 272 p.: Ill. (In Russ.).
17. Pustovoitov V.P., Kilimov S.L., Chernomaz V.S. *Fiberglass in Construction*; Edited by V.A. Teleshova. M.: Stroyizdat, 1978. 212 p. (In Russ.).
18. GOST 25.603–82 *Methods of Mechanical Testing of Composite Materials with a Polymer Matrix (Composites)*. Method for Tensile Testing of Ring Samples at Normal, Elevated and Low Temperatures. M.: Interstate Standard, 1984. 12 p. (In Russ.).
19. GOST 33349–2015 *Polymer Composites*. Production of Plates by Winding for the Production of Test Specimens. M.: Standartinform, 2015. 20 p. (In Russ.).
20. RU Patent No 2597811. *A Method for the Measurement of Mechanical Behavior of Hollow Tubular Items Made of Polymer Composite Materials* / V.V. Samoilenko, A.N. Blaznov, V.V. Firsov, et al. Application No 2015128703, 14.07.2015, Published 20.09.2016, Bull. No 26. (In Russ.).
21. Samoilenko V.V. Development of Program Control System for the Fabrication of Filament-Wound Items from Polymer Composite Materials. *Polunovskiy Vestnik*. 2016. No 4. Vol. 1. P. 225–228. (In Russ.).
22. Zhurkovsky M.E., Sakoshev Z.G., Blaznov A.N. et al. Study of the Mechanical Properties of Winding Hybrid Polymer Composite Materials. *South Siberian Scientific Bulletin*. 2018. No 3 (23). P. 39–43. DOI 10.25699/SSSB.2018.23.17555 (In Russ.).
23. Blaznov A.N., Sakoshev Z.G., Zhurkovsky M.E., et al. Development of Control Programs for a Winding Installation and Research of PCM with Various Reinforcement Schemes. *South Siberian Scientific Bulletin*. 2019. No 4. Vol. 2. P. 13–18. DOI: 10.25699/SSSB.2019.28.48965 (In Russ.).
24. Medvedev P.A., Blaznov A.N., Sakoshev E.G.. et al. Automation of Production Processes and Testing of Plates from Polymer Composite Materials *South Siberian Scientific Bulletin*. 2024. No 2. P. 166–172. DOI: 10.25699/SSSB.2024.54.2.022. (In Russ.).

Информация об авторах

П.А. Медведев, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории материаловедения минерального сырья, Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск, Россия;

А.Н. Блазнов, доктор технических наук, заведующий лабораторией материаловедения минерально-сырья, Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН; профессор кафедры машин и аппаратов химических и пищевых производств, Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия;

Е.Г. Сакошев, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории материаловедения минерального сырья, Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск, Россия;

З.Г. Сакошев, младший научный сотрудник лаборатории материаловедения минерального сырья, Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск, Россия;

В.В. Фирсов, ведущий инженер лаборатории материаловедения минерального сырья, Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск, Россия;

А.А. Кораблин, лаборант лаборатории материаловедения минерального сырья, Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН; студент, Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия.

Information about the authors

P.A. Medvedev, Postgraduate Student, Junior Researcher at the Laboratory of Materials Science and Mineral Raw Materials, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk, Russia;

A.N. Blaznov, Doctor of Sciences in Technology, Head of the Laboratory of Materials Science and Mineral Raw Materials, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS; Professor of the Department of Machines and Apparatuses of Chemical and Food Production, Biysk Technological Institute, Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russia;

E.G. Sakoshev, Postgraduate Student, Junior Researcher at the Laboratory of Materials Science and Mineral Raw Materials, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk, Russia;

Z.G. Sakoshev, Junior Researcher at the Laboratory of Materials Science and Mineral Raw Materials, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk, Russia;

V.V. Firsov, Lead Engineer at the Laboratory of Materials Science and Mineral Raw Materials, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk, Russia;

A.A. Korablin, Laboratory Assistant at the Laboratory of Materials Science and Mineral Raw Materials, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk Technological Institute, Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russia.