

УДК: 691.175.3

DOI: 10.52409/20731523_2023_4_241

EDN: QQUTHA



Оценка напряженно-деформированного состояния гибридных полимерных композитов, изготовленных методом вакуумной инфузии

А.И. Валиев¹, Ф.Р. Шакирзянов¹, А.М. Сулейманов^{1,2}, Р.К. Низамов^{1,2}

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

²Академия наук Республики Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Разработка гибридных полимерных композитов (с гетероолокнистым наполнением) конструкционного назначения неразрывно связано с необходимостью увеличения прочностных и жесткостных характеристик композитов. Для успешного внедрения гибридных композитов в строительную практику, необходимым является совершенствование моделирования и оценки их напряженно-деформированного состояния на различных этапах разработки. Цель исследования заключается в разработке и оценке напряженно-деформированного состояния изделий из гибридных композитов, выполненных методом вакуумной инфузии при трехточечной схеме нагружения. Задачами исследования являются: изготовление композитов из стеклопластика, углепластика, и их гибридов; определение физико-механических характеристик композитов; верификация аналитической и численной модели с натурными испытаниями.

Результаты. Изготовлены композиты из стеклопластика, углепластика и гибридные композиты с различным сочетанием стеклянных и высокопрочных углеродных волокон и низковязкой эпоксидной смолы методом вакуумной инфузии. Проведены испытания на растяжение, сжатие, межслоевой сдвиг, трехточечный изгиб и определены физико-механические характеристики материалов, а также плотность, потеря массы при прокаливании отвержденных армированных смол. Разработана численная модель многослойных композитов, получено напряженно-деформированное состояние балок, проведена верификация аналитической и численной модели с экспериментом при трехточечной схеме нагружения.

Выводы. Значимость полученных результатов в строительной отрасли заключается в оценке напряженно-деформированного состояния гибридных композитов с целью дальнейшего внедрения в строительную практику и рекомендовано при решении научных и инженерных задач.

Ключевые слова: полимер, стеклопластик, углепластик, гибрид, растяжение, сжатие, межслойный сдвиг, трехточечный изгиб, вакуумная инфузия

Для цитирования: Валиев А.И., Шакирзянов Ф.Р., Сулейманов А.М., Низамов Р.К. Оценка напряженно-деформированного состояния гибридных полимерных композитов, изготовленных методом вакуумной инфузии//Известия КГАСУ, 2023, № 4(66), с. 241-254, DOI: 10.52409/20731523_2023_4_241, EDN: QQUTHA

Estimation of stress-strain state of hybrid polymer composites manufactured by vacuum infusion method

A.I. Valiev¹, F.R. Shakirzyanov¹, A.M. Suleymanov^{1,2}, R.K. Nizamov^{1,2}

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

²Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

Abstract. Problem statement. The development of hybrid polymer composites (with heterofiber filling) for structural purposes is inextricably linked with the need to increase the strength and stiffness characteristics of composites. For successful implementation of hybrid composites in construction practice it is necessary to improve modeling and evaluation of their stress-strain state at various stages of development. The aim of the study is to develop and evaluate the stress-strain state of products from hybrid composites made by vacuum infusion at three-point loading scheme. The objectives of the research are fabrication of composites from fiberglass, carbon fiber, and their hybrids; determination of physical and mechanical characteristics of composites; verification of analytical and numerical model with field tests.

Results. Glass fiber-reinforced plastic, carbon fiber-reinforced plastic and hybrid composites with different combination of glass and high-strength carbon fibers and low-viscosity epoxy resin were produced by vacuum infusion method. Tensile, compression, interlayer shear, and three-point bending tests were performed and the physical and mechanical characteristics of the materials were determined, as well as the density, mass loss on ignition of the cured reinforced resins. A numerical model of multilayer composites was developed, the stress-strain state of beams was obtained, and verification of the analytical and numerical model with experiment was carried out under three-point loading scheme.

Conclusions. The significance of the obtained results in the construction industry lies in the evaluation of the stress-strain state of hybrid composites for the purpose of further implementation in construction practice and it is recommended in solving scientific and engineering problems.

Keywords: polymer, fiberglass, carbon fiber, hybrid, tension, compression, interlayer shear, three-point bending, vacuum infusion

For citation: Valiev A.I., Shakirzyanov F.R., Suleymanov A.M., Nizamov R.K. Estimation of stress-strain state of hybrid polymer composites manufactured by vacuum infusion method//News KSUAE, 2023, № 4(66), с. 241-254, DOI: 10.52409/20731523_2023_4_241, EDN: QQUTHA

1. Введение

В строительной практике для успешного внедрения полимерных композитов необходимо совершенствовать численное моделирование их напряженно-деформированного состояния на этапе проектирования, изготовления, мониторинга при эксплуатации, а также при прогнозировании упруго-механических свойств с использованием численного обучения [1-3].

Изготовление гибридных композитных материалов может существенно улучшить физико-механические и эксплуатационные свойства композитов, что будет способствовать их востребованности в строительстве. Одним из основных недостатков стеклопластиковых материалов является - низкая прочность и жесткость. Высокопрочные борные волокна хорошо выдерживают большие изгибные напряжения (они могут быть успешно использованы в местах соединений), в то время как углеродные волокна прекрасно работают на кручение и сжатие в арочных конструкциях.

Необходимость определения напряженно-деформированного состояния с последующим проведением верификации численной модели для полимерных композитов конструкционного назначения, в частности гибридных (с гетероволоконистым наполнением) является актуальным [4-6]. Также решением ключевой проблемы,

сдерживающей широкое применение композитов, является оценка прочности согласно второй группе предельных состояний, по которому элементы конструкции должны удовлетворять нормальным условиям эксплуатации (в частности по деформациям), препятствуя уменьшению долговечности по сравнению с предусматриваемым сроком службы. Достижение предельных деформаций элементов конструкций, устанавливаемых исходя из технологических, конструктивных, эстетико-психологических требований по ГОСТ 27751-2014 и СП 20.13330.2016 (предельные прогибы, нормативные и расчетные значения нагрузок) [7, 8].

Согласно ГОСТ Р 54928-2012 «Пешеходные мосты и путепроводы из полимерных композитов» основные несущие конструкции рекомендуется изготавливать из термореактивных смол, армированных стекловолокном и/или углеволокном по технологии вакуумной инфузии, для остальных конструктивных элементов возможно изготовление пултрузией, ручной выкладкой или другими способами производства [9, 10].

Полимерные композиты (ПК) имеют анизотропию механических свойств как всего материала, так и каждого его слоя. Рациональное же расположение слоев позволяет увеличить прочность и жесткость ПК. Для оценки напряженно-деформированного состояния гибридных ПК при трехточечной схеме нагружения необходимы определить механические характеристики при растяжении, сжатии, межслойном сдвиге стеклопластика и углепластика по действующим нормативным документам. С этой целью были изготовлены пластины из стеклопластика, углепластика, а также их гибриды.

Целью работы является оценка напряженно-деформированного состояния гибридных ПК, изготовленных методом вакуумной инфузии при трехточечной схеме нагружения.

Для достижения цели необходимо:

- Изготовить композиты из стеклопластика, углепластика, и их гибридов;
- определить физико-механические характеристики композитов;
- верифицировать аналитическую и численную модель с результатами натуральных испытаний.

2. Материалы и методы

Для изготовления пластин использовались следующие материалы наполнителей и связующего.

Материалы наполнителя:

1. Однонаправленная углеродная ткань Fib Arm Tape 230 производства АО «Юматекс» Госкорпорации «Росатом» (ТУ 1916-018-61664530-2013).
2. Однонаправленная стеклянная ткань (лента) Ortex 400 O 250 производства «БауТекс» (ТУ 13.20.46.000-006-52788109-2019)

Связующее:

Эпоксидная низковязкая смола L (является бисфенольной (A+F), разбавляется бифункциональным соединением, эпоксидное число равно 0,56 (100/экв.), а эпоксидный эквивалент составляет 179 (г/экв.) с вязкостью при 25°C – 710±70 мПа·с с отвердителем GL2 (составы алифатических/циклоалифатических аминов) производства R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, Германия (соотношение «Смола L-отвердитель GL2»-100:30, вязкость при 25°C – 248±100 мПа·с).

Полимерные композиционные пластины, в том числе гибридные, изготавливались методом вакуумной инфузии с использованием мобильной установки для инфузии MBC-20-01 (с цифровым вакуумметром, поддерживающим заданное давление).

Рассмотрены следующие варианты полимерных композиционных пластин:

1. Пластина из стеклопластика из 8 слоев стеклянной ткани;
2. Пластина из углепластика из 10 слоев углеродной ткани;
3. Гибридная пластина (1) из угле- стеклопластика с чередованием слоев (11 слоев углеродной ткани, 10 слоев стеклянной ткани), симметричной относительно нейтральной оси;
4. Гибридная пластина (2) из угле- стеклопластика с толщиной углепластика по 2 слоя (4 слоя углеродной ткани, 17 слоев стеклянной ткани), симметрично

относительно нейтральной оси;

Алгоритм изготовления полимерных композиционных материалов, в том числе гибридных методом вакуумной инфузии (рис. 1):

1. Подготовка формы под ПК. Форма выполняется из химически устойчивых материалов, способных выдерживать технологические температуры, без дефектов. На поверхность формы наносят разделительный агент;
2. Укладка слоя, которая разделяет оснастку и наполнители (укладка «жертвенной» ткани) с целью устранения неровностей поверхности, сохранения чистоты поверхности, удаляется после завершения технологического процесса;
3. Укладка слоев наполнителя;
4. Укладка «технологического» слоя (выкладка вспомогательных материалов), а именно повторная укладка «жертвенной ткани» (по желанию), укладка дренажной сетки для отвода воздуха и распределения смолы, которая будет поступать через распределительные трубки (для удобства работ, а именно для простоты отклеивания при расформовке изделия под дренажную сетку устанавливается разделительный слой), также укладка каналов распределения смолы (спиральные трубки) и вакуумных линий;
5. Герметизация формы. С целью герметизации используется многослойная композитная пленка для вакуумной инфузии большего размера, чем само изделие, которая крепится к форме с использованием герметизирующего жгута;
6. Пропитка изделия смолой (низкой вязкости, с низким экзотермическим пиком);
7. Расформовка изделия с дальнейшим постотверждением (постотверждение изделий выполнялось при температуре 40°C в течении 15 часов в климатической камере ИЛКА).

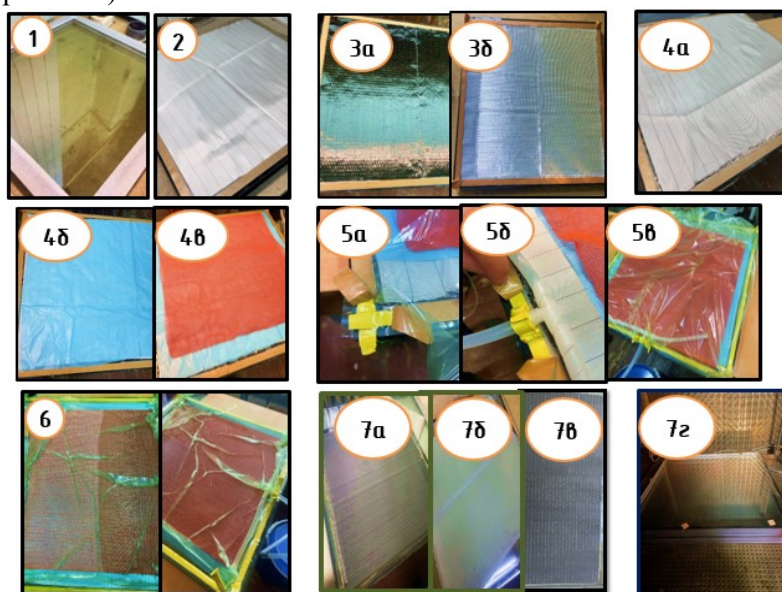


Рис. 1. Алгоритм изготовления полимерных композиционных материалов, в том числе гибридных, методом вакуумной инфузии

(1-подготовка формы; 2-укладка «жертвенной» ткани; 3а,б-укладка наполнителя (углеткани/стеклоткани); 4а-повторная укладка «жертвенной ткани»; 4б-укладка разделительного слоя под дренажную сетку; 4в-укладка дренажной сетки, 5а, б, в-процессы герметизации формы, 6-пропитка изделия смолой;

7-а, б, в-готовое изделие из углепластика/стеклопластика/гибрида;

7г-постотверждение изделия в климатической камере ИЛКА) (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Algorithm of manufacturing polymer composite materials, including hybrid ones, by vacuum infusion method

(1-preparation of the mold; 2-laying of the "sacrificial" fabric; 3a,b-laying of the filler (carbon fiber/glass fabric); 4a-repeated laying of the "sacrificial fabric"; 4b-laying of the separating layer under the drainage mesh; 4c-laying of the drainage mesh, 5a, b, c-processes of mold sealing, 6-impregnation of the product with resin;

7a, b, c-finished carbon fiber/glass fiber/hybrid product;

7d-post-curing of the product in the ILKA climatic chamber) (illustration by the authors)

Готовые изделия в виде пластин из углепластика с однонаправленным армированием с толщиной монослоя 0,22-0,24 мм, и пластины из стеклопластика толщиной 0,27-0,29 мм подвергались механической обработке (герметизация вакуумным мешком, разницы давлений вызывает небольшую разнотолщинность в пределах нормы) с целью подготовки образцов на станке ЧПУ, конденсации по ГОСТ 12423, ГОСТ 56762 с последующим определением следующих физико-механических характеристик:

а) испытания на растяжение для углепластиков (ГОСТ Р 56785-2015), для стеклопластиков (ГОСТ 32656-2017, ГОСТ 11262), отвержденного связующего (ГОСТ 11262-2017);

б) испытания на межслоевой сдвиг (ГОСТ 32659-2014);

в) испытания на трехточечный изгиб (ГОСТ Р 56805-2015);

г) определение плотности (ГОСТ 57713-2017);

д) определение потерь массы при прокаливании отвержденных армированных смол (ГОСТ 57042-2016).

С помощью упрощенного стереоскопического микроскопа МПСУ-1 (при увеличении оптической головки в 0,5 крат) путем присоединения адаптера AmScore SLR/DSLR (с увеличением 2х) совместимым с зеркальным фотоаппаратом Nikon D3100 (14,2 мегапикселей) были получены микрофотографии, выполнены фото разрушения гибридного ПК (1) и гибридного ПК (2) при трехточечной схеме нагружения. По ГОСТ 57042-2016 определялись потери массы при прокаливании отвержденных армированных смол, по ГОСТ 57713-2017 определялись плотности композитов.

Считается, что при трехточечном изгибе полимерной композиционной балки общий прогиб (w , мм) будет состоять из двух слагаемых: прогиба от изгибающего момента ($w^{\text{изг}}$, мм) и прогиба от сдвига ($w^{\text{сдв}}$, мм) под действием поперечной силы [11].

$$w = w^{\text{изг}} + w^{\text{сдв}}, \quad (1)$$

где

$$w^{\text{изг}} = \frac{Pl^3}{48E_x^{\text{и}}J}, \quad (2)$$

Прогиб от сдвига состоит из двух слагаемых: упругая и вязкоупругая:

$$w^{\text{сдв}} = w^{\text{упруг}} + w^{\text{в}} = \frac{Pla}{4G_{xz}^{\text{и}}A} + \frac{y^{\text{в}}l}{2}, \quad (3)$$

Здесь, P – нагрузка (Н), l – расстояние между опорами (мм), $E_x^{\text{и}}$ – действительный модуль упругости при поперечном изгибе (МПа), J – момент инерции поперечного сечения (мм^4), $G_{xz}^{\text{и}}$ – модуль сдвига при поперечном изгибе (МПа), A – площадь сечения (мм^2). Коэффициент a зависит от формы поперечного сечения, которая для прямоугольного сечения равняется $a=1,2$;

$y^{\text{в}}$ – неупругая часть деформации сдвига;

$$w = \frac{Pl^3}{48E_x^{\text{и}}J} + \frac{Pla}{4G_{xz}^{\text{и}}A} + \frac{y^{\text{в}}l}{2}. \quad (4)$$

При расчете строительных конструкций должно выполняться условие:

$$w \leq w_{\text{max}} \quad (5)$$

где, w_{max} – предельный прогиб (выгиб) или перемещение согласно СП 20.13330.2016.

Вязкопластическая часть деформаций вдоль волокон в первом приближении расчета композитных материалов не учитывается.

Тогда соотношение (4) примет вид:

$$w = \frac{Pl^3}{48E_x^{\text{и}}J} + \frac{Pla}{4G_{xz}^{\text{и}}A} \quad (6)$$

Модуль упругости $E_{\text{и}}^{\text{п}} = \frac{\Delta FL^3}{4bh^3\Delta\omega}$, определенный по ГОСТ 56805-2015, является фиктивным, так как не отражает влияние сдвигов, т.е. $E_{\text{и}}^{\text{п}} \neq E_x^{\text{и}}$. Отличие фиктивного модуля упругости $E_{\text{и}}^{\text{п}}$ от действительного $E_x^{\text{и}}$ тем значительнее, чем больше h/l и чем

выше степень анизотропии. Между $E_{и}^n, E_x^n, G_{xz}^n$ существует линейная зависимость (упрощенный подход С.П. Тимошенко):

$$\frac{1}{E_{и}^n} = \frac{1}{E_x^n} + \frac{1,2}{G_{xz}^n} \left(\frac{h}{l}\right)^2 \quad (7)$$

Тогда модули E_x^n и G_{xz}^n находится из графика $\frac{w}{pl} - l^2$ при различных h/l [12].

Модуль сдвига также можно определить согласно натурным испытаниям по ГОСТ Р 56799, ГОСТ 33843-2016 и др., которые предполагают довольно трудоемкое проведение испытаний.

Допускаемая деформация балок, в том числе и прогибы несущих элементов конструкций необходимо рассчитывать с значениями модулей упругости при максимальных температурах эксплуатации, а также изменения его значений в конце срока службы конструкции (ГОСТ Р 54928).

Так, согласно [11] действительный модуль упругости E_x^n для пултрузионных стеклопластиков рекомендуется принимать по наименьшим значениям расчетных значений модулей упругости при растяжении (в работе [13] также принимают $E_x^n = E^p$ в направлении 0°) и сжатии с учетом различных коэффициентов условий работы:

$$E^p = E^n \gamma_T \gamma_w \gamma_{дл} \quad (8)$$

Для модуля сдвига G_{xz}^n , определенного по испытаниям, аналогично:

$$G^p = G^n \gamma_T \gamma_w \gamma_{дл} \quad (9)$$

При отсутствии i -ой нагрузки - $\gamma_i = 1$.

γ_T – коэффициент условий работы при постоянно действующих повышенных температурах, превышающих 25°C , принимаемый по формуле:

$$\gamma_T = -0,0069T + 1,1385 \quad (10)$$

где T - постоянно действующая повышенная температура эксплуатации, $^\circ\text{C}$.

Сезонное повышение температуры выше 25°C , нагрев профилей под воздействием солнца не влияют на значение коэффициента γ_T .

γ_w – коэффициент условия работы, учитываемый при постоянном увлажнении поверхности конструкции из профилей конденсатом, обрызгиванием, проливом или длительном нахождении конструкций из профилей в воде (под слоем воды), и определяется по формуле:

$$\gamma_w = 1,1409 \left(\frac{t}{t_0}\right)^{-0,037} \quad (11)$$

Климатические воздействия в виде осадков (снег, дождь и т.п.) не влияют на значения коэффициента γ_w .

$\gamma_{дл}$ – коэффициент условий работы, учитывающий длительную нагруженность конструкций, принимаемый по формуле:

$$\gamma_{дл} = 0,8319 \left(\frac{t}{t_0}\right)^{-0,044} \quad (12)$$

где t – время эксплуатации под действием соответствующей нагрузки, в часах, $t_0 = 1$ час. При постоянной нагрузке: t будет равно сроку эксплуатации конструкции. При временной длительной нагрузке - t будет равно времени нахождения конструкции под нагрузкой, при этом интервалы времени в процессе эксплуатации конструкции суммируются; при кратковременной нагрузке - $\gamma_{дл} = 1$.

Также согласно [11] при наличии специализированного программного обеспечения, позволяющего учесть работу разномодульного анизотропного материала, расчет рекомендуется выполнять с учетом приведенного модуля упругости $E_{пр}$, определяемого по формуле:

$$E_{пр} = E_{t,L}^p \frac{I_1}{I} + E_{c,L}^p \frac{I_2}{I} \quad (13)$$

где $E_{t,L}^p$ и $E_{c,L}^p$ – расчетные модули упругости при растяжении и сжатии в направлении 0° , kH/m^2 соответственно;

I_1 и I_2 – моменты инерции в растянутой и сжатой зоны сечения относительно нейтральной оси, m^4 ;

I – момент инерции всего сечения относительно нейтральной оси, принимаемые соответственно в плоскости наибольшей или наименьшей жесткости вдоль осей X или Y , m^4 .

Определение напряженно-деформированного состояния балок из стеклопластика, углепластика, гибрида на трехточечный изгиб выполнен в ПК «ANSYS 2020 R2». Физико-механические характеристики для ПК приняты согласно, проведенным экспериментальным исследованиям. Расчет выполнен в предположении, что слои многослойного материала идеально связаны между собой, т.е взаимное проскальзывание слоев отсутствует, слои деформируются совместно и линейно, в структуре отсутствуют дефекты и поры, взаимодействие на межфазной границе идеальное. Толщина монослоя для стеклопластика принята равной 0,28 мм, для углепластика 0,23 мм. В расчете использовался конечный элемент SOLID 186.

3. Результаты и обсуждение

В результате проведенных натурных испытаний (рис.2), определены физико-механические характеристики полимерных композиционных материалов и представлены в табл. 1.

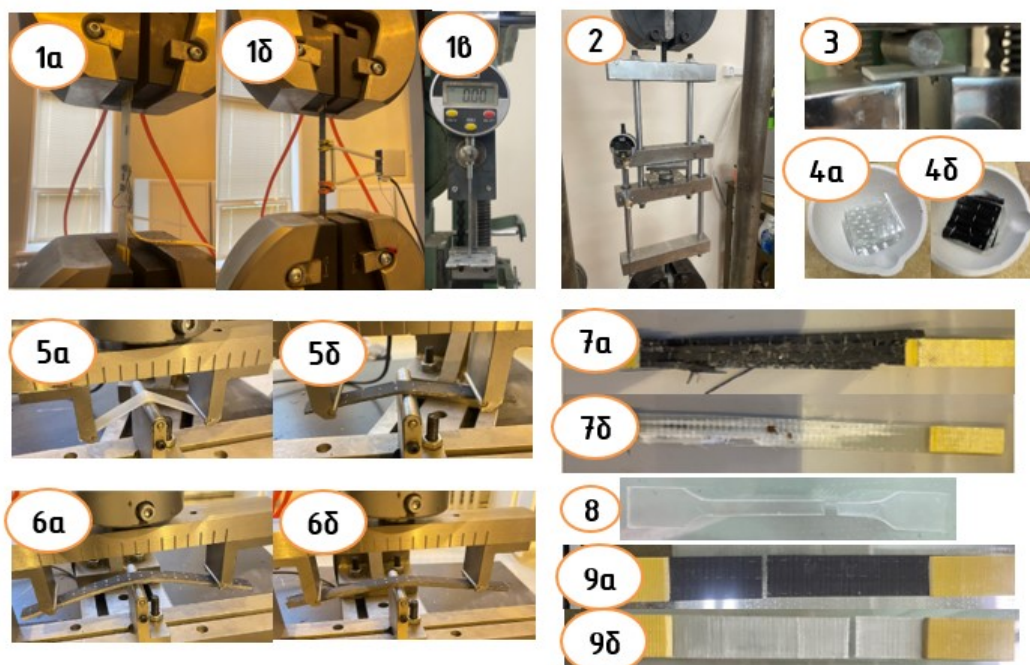


Рис. 2. Испытания полимерных композиционных материалов, в том числе гибридных (1а, б, в-испытания на растяжение стеклопластиков, углепластиков, отвержденных связующих соответственно; 2-испытания на сжатие; 3- испытания на межслойный сдвиг; 4а, б- определение потерь массы при прокаливании отвержденных армированных смол стеклопластика и гибридного образца соответственно; 5а, б-испытания на трехточечный изгиб стеклопластика/углепластика соответственно; 6а, б-испытания на трехточечный изгиб гибридного ПК (2)/ гибридного ПК (1) соответственно; 7а, б- разрушенные образцы из углепластика/стеклопластика при растяжении (направление 0°) соответственно; 8-разрушенный образец отвержденного связующего; 9а,б- разрушенные образцы из углепластика/стеклопластика при растяжении (направление 90°) (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Tests of polymer composite materials, including hybrid materials (1a, b, c-tensile tests of FRP, CFRP, cured binders, respectively; 2-compression tests; 3- interlayer shear tests; 4a, b-determination of mass loss on ignition of cured reinforced resins of FRP and hybrid specimen, respectively; 5a, b-three-point bending tests of FRP/Carbon fiber-reinforced plastic, respectively; 6a, b - three-point bending tests of hybrid PC (2)/ hybrid PC (1), respectively; 7a, b - broken carbon fiberglass/glass fiberglass samples in tension (0° direction), respectively; 8 - broken sample of cured binder; 9a, b - broken carbon fiberglass/glass fiberglass samples in tension (90° direction) (illustration by the authors)

По результатам испытаний установлено, что значения предела прочности на растяжение в направлении 0° высокие, т.е. значения, присущие к углепластикам, больше на 56,6% по сравнению со стеклопластиками.

По результатам определения прочности на растяжение в направлении 90° для композитов наблюдаются низкие значения, меньше на 71,2% для углепластиков и 17% для стеклопластиков по сравнению с отвержденным связующим, что говорит на данном этапе о плохой адгезии между углеродными волокнами и полимерным связующим. Также это подтверждается результатами определения предела прочности при межслоевом сдвиге методом «короткой балки», разница значений между стеклопластиком и углепластиком составляет 33,4%.

Таблица 1

Вид испытания	Материал	Нормативный документ	Физико-механические характеристики	
			0°	90°
Растяжение	Стеклопластик	ГОСТ 32656-2017, ГОСТ 11262	$E=59,8$ ГПа $\sigma_b=809,6$ МПа $\nu=0,26$	$E=14,3$ ГПа $\sigma_b=60,85$ МПа
	Углепластик	ГОСТ Р 56785-2015	$E=124,01$ ГПа $\sigma_b=1865,08$ МПа $\nu=0,27$	$E=5,9$ ГПа $\sigma_b=21,11$ МПа
	Отвержденное связующее	ГОСТ 11262-2017	$\sigma_{pm}=73,33$ МПа	
Межслоевой сдвиг	Стеклопластик	ГОСТ 32659-2014	$\tau=49,61$ МПа	
	Углепластик		$\tau=33,05$ МПа	
	Гибридный ПК (1)		$\tau=41,4$ МПа	
	Гибридный ПК (2)		$\tau=47,52$ МПа	
Изгиб	Стеклопластик	ГОСТ Р 56805-2015	$\sigma_{II}^B=815,49$ МПа $E_{II}^B=34,17$ ГПа	
	Углепластик		$\sigma_{II}^B=466,2$ МПа $E_{II}^B=104,19$ ГПа	
	Гибридный ПК (1)		$\sigma_{II}^B=574,31$ МПа $E_{II}^B=67,4$ ГПа	
	Гибридный ПК (2)		$\sigma_{II}^B=881,54$ МПа $E_{II}^B=58,08$ ГПа	
Плотность	Стеклопластик	ГОСТ 57713-2017	2000 кг/м ³	
	Углепластик		1500 кг/м ³	
Определение потерь массы при прокаливании отвержденных армированных смол	Стеклопластик	ГОСТ 57042-2016	$X=24$ %	
	Углепластик		$X=35$ %	
	Гибридный ПК (1)		$X=29,2$ %	
	Гибридный ПК (2)		$X=25,6$ %	

Определение потерь масс при прокаливании отвержденных армированных смол проводилось с целью определения соотношения компонентов «наполнитель-матрица», которая, в частности, влияет на упруго-механические характеристики готового изделия. По результатам испытания наблюдается, что для углепластика требуется на 31,4% больше связующего, чем для стеклопластика. Для гибридных ПК уменьшение соотношения эпоксидного связующего к наполнителю по сравнению с углепластиком для гибридного ПК (1) составила 16,6%, для гибридного ПК (2) 26,9%. Теоретически, содержание волокон не зависит от их диаметров, но, несмотря на это, в системе, которая содержит в себе волокна с меньшим диаметром сложнее всего преодолеть трение, удалять избыток связующего. В случае углеродных волокон, которые имеют почти в 2 раза меньший диаметр, чем стеклянные волокна, максимальное содержание волокна составляет 65%, для стеклопластика около 80%. Необходимо отметить, что в элементах

конструкций, которые подвержены к восприятию сдвиговых нагрузок не рекомендуется использование высокоармированных композитов, для атмосферостойких конструкций также в основном используются композиты с повышенным содержанием связующего. Так, гибридные ПК кроме улучшения упруго-механических показателей, также позволяют регулировать и соотношение связующего в материале.

Для расчетов в ПК «ANSYS 2020 R2» были приняты следующие параметры:

1) Коэффициент Пуассона в направлении 90° для стеклопластика и углепластика принят равным $\nu=0,1$ (по формуле $\nu(90^\circ) = \frac{E(90^\circ)}{E(0^\circ)} * \nu(0^\circ)$).

2) Модуль сдвига для гибридного ПК (1), изготовленного чередованием углеволокон и стекловолокон, и для гибридного ПК (2) из стеклопластика, армированного сверху и снизу двумя слоями из углепластика, определен по результатам испытаний на изгиб с построением графика $\frac{w}{pl} - l^2$ при предельном прогибе в упругой зоне w_{max} согласно СП 20.13330.2016, в данном случае w_{max} при $F=20$ Н. Результаты определения G_{xz}^i, E_x^i приведены в табл. 2.

Таблица 2

Материал	G_{xz}^i , ГПа	E_x^i , ГПа
Гибридный ПК (1)	6,01	84,67
Гибридный ПК (2)	6,16	104,49

По такому же принципу, модуль сдвига для стеклопластика составил 7,3 ГПа, для углепластика 8,3 ГПа.

3) Относительные деформации *стеклопластика*:

- а) Растяжение в направлении X – $\epsilon_x^+ = 0,0135$;
- б) Растяжение в направлении Y и Z – $\epsilon_y^+ = \epsilon_z^+ = 0,0043$;
- в) Сжатие в направлении X – $\epsilon_x^- = 0,0039$;
- г) Сжатие в направлении Y и Z – $\epsilon_y^- = \epsilon_z^- = 0,0097$;
- д) Сдвиг – $\epsilon_{xy} = \epsilon_{xz} = \epsilon_{yz} = 0,0068$.

4) Относительные деформации *углепластика*:

- а) Растяжение в направлении X – $\epsilon_x^+ = 0,015$;
- б) Растяжение в направлении Y и Z – $\epsilon_y^+ = \epsilon_z^+ = 0,0036$;
- в) Сжатие в направлении X – $\epsilon_x^- = 0,0014$;
- г) Сжатие в направлении Y и Z – $\epsilon_y^- = \epsilon_z^- = 0,0168$;
- д) Сдвиг – $\epsilon_{xy} = \epsilon_{xz} = \epsilon_{yz} = 0,004$.

Диаграммы «Напряжение-прогиб» по результатам натуральных испытаний гибридных композитов на трехточечный изгиб приведены на рис. 3.

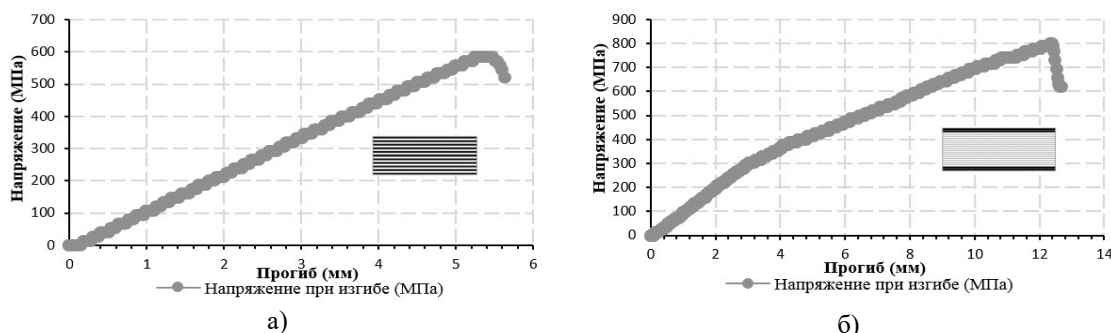


Рис. 3. Диаграмма «Напряжение-прогиб» по результатам натуральных испытаний для а) гибридного ПК (1), б) гибридного ПК (2) (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Stress-deflection diagram" based on the results of field tests for а) hybrid PC (1), б) hybrid PC (2) (illustration by the authors)

По результатам определения прочности при трехточечном изгибе наибольшая прочность наблюдается у гибридного ПК (2), наименьшая у углепластика. При этом, модуль упругости у гибридного ПК (2) при добавлении по 2 слоя углеткани симметрично относительно нейтральной оси увеличивается по сравнению со стеклопластиком на 41,2%, при чередовании слоев на 49,3%. Модуль упругости углепластика по сравнению

со стеклопластиком больше на 67,2%. Таким образом, сочетание стеклянных и углеродных волокон позволяет увеличить модуль упругости при изгибе, уменьшая прогибы. Прогиб определен по траверсе испытательной машины. При проведении испытаний на изгиб происходит локальное деформирование в районе пуансона и опор, поэтому значения прогибов, определенных по траверсе, считается больше истинного прогиба образца [12].

Диаграммы «Напряжение/Нагрузка - относительная деформация на внешней поверхности образца» по результатам натурных испытаний приведены на рис. 4.

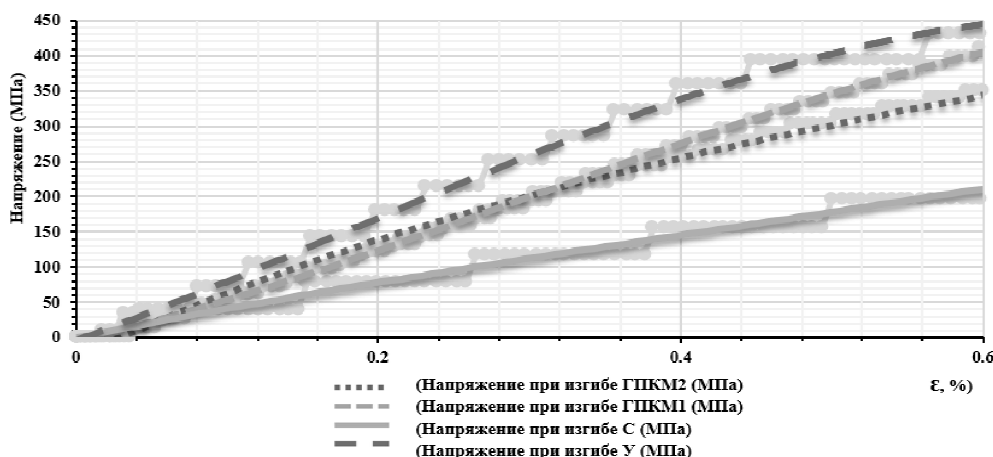


Рис. 4. Диграмма «Напряжение/нагрузка-относительная деформация» по результатам натурных испытаний (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Stress/load-relative strain diagram based on the results of in-situ tests (illustration by the authors)

Из диаграммы видно, что добавление углеродного волокна в сжатой и растянутой зонах заметно уменьшает общий прогиб по сравнению со стеклопластиком. Фото разрушения гибридного ПК (1) и гибридного ПК (2) представлены на рис. 5.

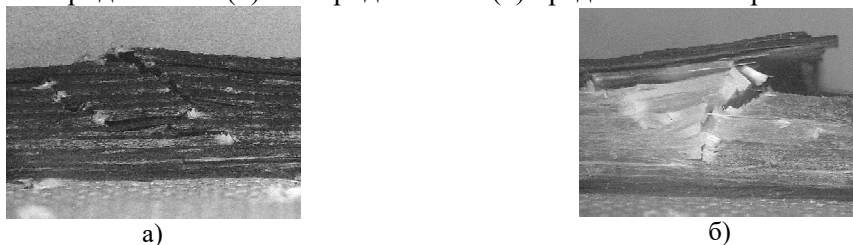


Рис. 5. Фото разрушения а) гибридного ПК (1), б)гибридного ПК (2) при трехточечной схеме нагружения (иллюстрация авторов)

Fig. 5. Photo of a) hybrid PC (1), b) hybrid PC (2) fracture under three-point loading scheme (illustration by the authors)

На рис. 6 и 7 представлены напряженно-деформированные состояния для гибридного ПК (1) и гибридного ПК (2).

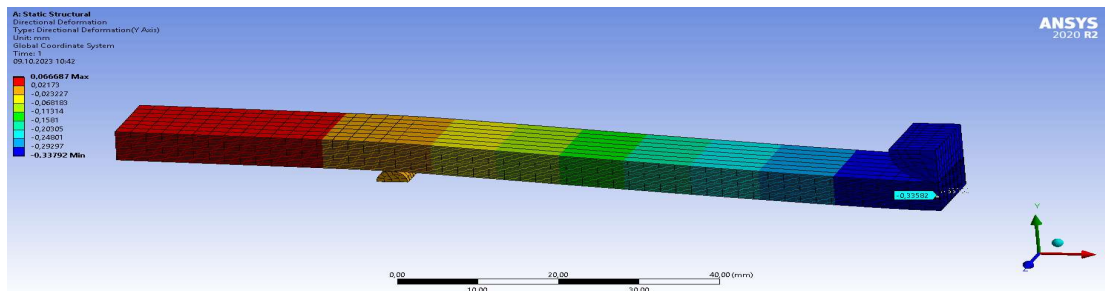


Рис. 6. НДС гибридного ПК (1) при трехточечной схеме нагружения (иллюстрация авторов)

Fig. 6. Stress-strain state of hybrid PC (1) under three-point loading scheme (illustration by the authors)

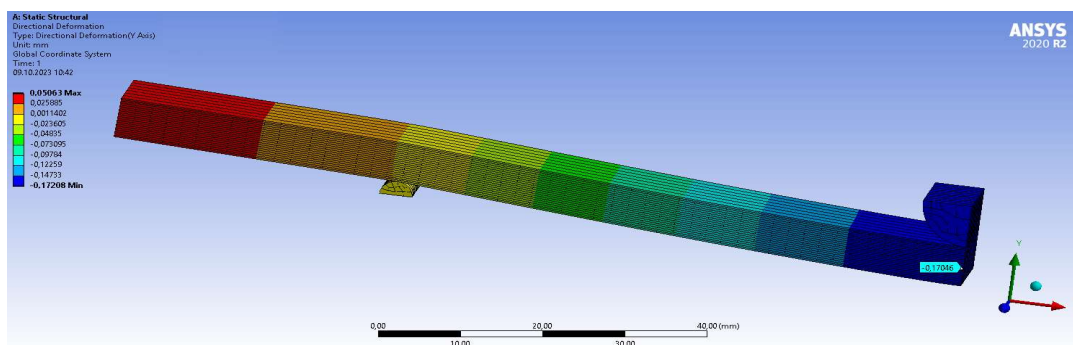


Рис. 7. НДС гибридного ПК (2) при трехточечной схеме нагружения (иллюстрация авторов)

Fig. 7. Stress-strain state of hybrid PC (2) under three-point loading scheme (illustration by the authors)

Результаты определения общего прогиба по результатам натуральных испытаний, теоретически по формуле 6 с применением упрощенного подхода С.П. Тимошенко, по численной модели в ПК «ANSYS 2020 R2», реализующий метод конечных элементов при $F=20$ Н приведены в табл. 3.

Таблица 3

Материал	w (натурный эксперимент)	w (по формуле 6-подход С.П. Тимошенко)	w (по результатам расчета в ПК «ANSYS 2020 R2»)
Гибридный ПК (1)	0,179	0,084	0,336
Гибридный ПК (2)	0,114	0,057	0,170

По результатам табл. 3 можно отметить, что прогибы, определенные по результатам расчета в ПК «ANSYS 2020 R2» больше, чем при натуральных испытаниях. Предполагаем, что это связано с синергетическим эффектом в гибридном композите, который нами объясняется как явление, при котором свойства гетероволоконистых ПК не определяются свойствами отдельно взятых компонентов, входящих в их состав. Причиной возникновения такого эффекта сопровождается наличием остаточных напряжений в композите, в частности из-за разной морфологии армирующих компонентов, различия коэффициентов температурного расширения.

Верификация упруго-механических характеристик с использованием метода конечных элементов с последующим прогнозированием промежуточных значений с помощью численного обучения [14, 15] является одним из способов предварительной оценки, этапом проектирования для изделий из ПК, гибридных ПК [16].

Следующим этапом внедрения гибридных полимерных композитов является обеспечение оптимальной стоимости, обеспечивающей экономическую эффективность на всех стадиях производства, монтажа, эксплуатации с последующей утилизации или возможности вторичного использования [17].

4. Заключение

В данной работе представлены результаты исследований гибридных композитов, изготовленных путем сочетания стеклянных и углеродных волокон и эпоксидного связующего методом вакуумной инфузии:

1. Проведены испытания по определению физико-механических характеристик стеклопластиков, углепластиков, и их гибридов. Увеличение модуля упругости при изгибе гибридного композита с толщиной по два слоя углепластика, симметрично относительно срединной плоскости, по сравнению со стеклопластиком составило 41,2%, для гибридного полимерного композита с чередованием составило 49,3 %. Высокая эффективность материала достигается уже при небольшом по объему содержании волокон;

2. Проведены испытания по определению прочности на растяжение в направлении 90° (меньше на 71,2% для углепластиков и 17% для стеклопластиков по сравнению с

отвержденным связующим), предела прочности при межслоевом сдвиге методом «короткой балки» полимерных композитов, по результатам которых была выявлена плохая адгезия между углеродными волокнами и полимерным связующим;

3. Выявлено, что для гибридных полимерных композитов по сравнению со стеклопластиками требуется больше связующего в среднем на 12,4%, что положительно сказывается для атмосферостойких конструкций, подверженных к восприятию сдвиговых нагрузок, а по сравнению с углепластиками требуется меньше связующего в среднем на 27,7%, что целесообразно с точки зрения экономии;

4. Выполнена оценка прогибов по напряженно-деформированному состоянию гибридных полимерных композитов теоретически, с использованием численной модели и по результатам натурных испытаний. Наименьший прогиб наблюдается при теоретическом подходе с использованием упрощенного подхода С.П. Тимошенко без учета вязкопластической части деформаций и без учета коэффициентов условий работы, наибольшие прогибы определены по конечно-элементной модели, которая предполагает, что слои композита деформируются совместно и линейно, структура гибридного композита без дефектов с идеальным взаимодействием компонентов. Прогибы по натурным испытаниям определены по траверсе и считаются больше истинных прогибов за счет локального деформирования в районе пуансона и опор;

5. Для внедрения гибридных полимерных композитов в строительную практику рекомендуется проведение работ по обеспечению межфазной области «волокон-матрица», которая при максимальном эффекте позволит в значительной степени использовать прочность наполнителя, оптимизационных расчетов с использованием численных моделей.

Список литературы/ References

1. Chen, C.-T.; Gu, G.X. Machine learning for composite materials. *MRS Commun.* 2019, 9, 556–566. DOI: 10.1557/mrc.2019.32.
2. Li, X.; Liu, Z.; Cui, S.; Luo, C.; Li, C.; Zhuang, Z. Predicting the effective mechanical property of heterogeneous materials by image based modeling and deep learning. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 2019, 347, 735–753.
3. Almeida-Fernandes, L.; Silvestre, N.; Correia, J.R.; Arruda, M. Fracture toughness-based models for damage simulation of pultruded GFRP materials. *Compos. Part B Eng.* 2020, 186. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107818.
4. Паймушин В.Н., Каюмов Р.А., Холмогоров С.А. Идентификация параметров реологических моделей косоугольно армированных волокнистых композитов/Труды Третьей международной конференции «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций». — М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018. — С. 90-93, издательство: Институт компьютерных исследований, М.–Ижевск, Россия, 2018, С. 90-93 с. [Paimushin V.N., Kayumov R.A., Kholmogorov S.A. Identification of parameters of rheological models of obliquely reinforced fiber composites / Proceedings of the Third International Conference "Deformation and Fracture of Composites". International Conference "Deformation and Fracture of Composite Materials and Structures". Materials and Structures". - M.-Izhevsk: Institute of Computer Research, 2018. - P. 90-93, Publisher: Institute of Computer Research, M.-Izhevsk, Russia, 2018, P. 90-93 p.]
5. Identification of Mechanical Characteristics of a Nonlinear-Viscoelastic Composite by Results of Tests on Shells of Revolution, издательство: Springer Science+Business Media, LLC, New York, Россия, Механика композиционных материалов и конструкций, 2019, 171-180 с. <https://doi.org/10.1007/s11029-019-09802-3>.
6. K. Khuziakhmetova, L. Abdrakhmanova, R. Nizamov. Polymer mixtures based on polyvinyl chloride for the production of construction materials // *Lecture Notes in Civil Engineering.* – 2021. – Vol. 169. – P. 14-21. – DOI 10.1007/978-3-030-80103-8_2. – EDN TDMAAU.
7. Hindersmann A. Confusion about infusion: An overview of infusion processes // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing.* 2019. Vol. 126. P. 55–83.

8. Zheng Y., Guo Z. Investigation of joint behavior of disk-lock and cuplock steel tubular scaffold // *Journal of Constructional Steel Research*. 2021. V. 177. DOI: 10.1016/J.JCSR.2020.106415.
9. Донецкий К.И., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Часть 1 // *Труды ВИАМ*. 2022. № 6 (112). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67. [Donetskiy K.I., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Infusion methods for the manufacture of polymer composite materials (review). Part 1. Trudy VIAM, 2022, no. 6 (112), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67.]
10. Хрульков А.В., Донецкий К.И., Усачева М.Н., Горянский А.Н. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Часть 2 // *Труды ВИАМ*. 2022. № 7 (113). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-50-62. [Khrulkov A.V., Donetskiy K.I., Usacheva M.N., Goryansky A.N. Infusion methods for the manufacture of polymer composite materials (review). Part 2. Trudy VIAM, 2022, no. 7 (113), paper no. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-50-62.]
11. Руководство по проектированию и расчету строительных конструкций из пултрузионных стеклопластиковых профилей производства ООО «Татнефть-Пресскомпозит», разработанного ЦНИИСК им. Кучеренко. 2016. - С. 49. [Guidelines for design and calculation of building structures made of pultruded fiberglass profiles manufactured by Tatneft-Presscomposite LLC, developed by Kucherenko Central Research Institute of Fiberglass Structures. 2016. - P. 49.]
12. Cowper, G.R. "The Shear Coefficient in Timoshenko's Beam Theory." National Aeronautical Establishment, National Research Council, Ottawa, Canada, 1966.
13. Михеев П.В., Муранов А.Н., Гусев С.А. Экспериментальное определение модуля межслоевого сдвига слоистого углепластика // *Конструкции из композиционных материалов*, Номер: 4 (140) Год: 2015 С 46-50. [Mikheev P.V., Muranov A.N., Gusev S.A. Experimental determination of the interlayer shear modulus of layered carbon fiber-reinforced plastic // *Structures of composite materials*, Number: 4 (140), 2015 P. 46-50.]
14. Chen, C.-T.; Gu, G.X. Machine learning for composite materials. *MRS Commun.* 2019, 9, 556–566. DOI: 10.1557/mrc.2019.32.
15. Ramprasad, R.; Batra, R.; Pilania, G.; Mannodi-Kanakkithodi, A.; Kim, C. Machine learning in materials informatics: Recent applications and prospects. *NPJ Comput. Mater.* 2017, 3, 1. DOI: 10.1038/s41524-017-0056-5.
16. Karamov, R.; Akhatov, I.; Sergeichev, I.V. Prediction of Fracture Toughness of Pultruded Composites Based on Supervised Machine Learning. *Polymers* 2022, 14, 3619. <https://doi.org/10.3390/polym14173619>.
17. Калинина, А.А. Развитие инновационного потенциала инвестиционно-строительного комплекса в условиях импортозамещения / А.А. Калинина // *Экономика и предпринимательство*. — 2022. — № 3(140). — С. 575–581. — DOI 10.34925/EIP.2022.140.03.105. [Kalinina, A.A. Development of innovative potential of the investment and construction complex in the conditions of import substitution / A.A. Kalinina // *Economics and Entrepreneurship*. - 2022. - № 3(140). - P. 575-581. - DOI 10.34925/EIP.2022.140.03.105.]

Информация об авторах

Валиев Алмаз Илсурович, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: tatcomposite@mail.ru

Фарид Рашитович Шакирзянов, кандидат физико-математических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: faritbox@mail.ru

Сулейманов Альфред Мидхатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, член-корр. Академии наук Республики Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: alfred-sulejmanov@yandex.ru

Низамов Рашит Курбангалиевич, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, академик Академии наук Республики Татарстан г. Казань, Российская Федерация

Email: Nizamov@kgasu.ru

Information about the authors

Almaz I. Valiev, post-graduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: tatcomposite@mail.ru

Farid R. Shakirzyanov, candidate of physical and mathematical sciences, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: faritbox@mail.ru

Alfred M. Suleymanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, corr.-m. Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

E-mail: alfred-sulejmanov@yandex.ru

Rashit K. Nizamov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, academic of Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

Email: Nizamov@kgasu.ru