

УДК 691.175.2
DOI 10.47367/0021-3497_2022_2_346

**ЭПОКСИДНЫЙ КОМПОЗИТ С УГЛЕРОДНЫМИ СТРУКТУРАМИ
В АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ
ДЛЯ ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**EPOXY COMPOSITE WITH CARBON STRUCTURES
IN ADDITIVE TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING PRODUCTS
FOR THE TEXTILE INDUSTRY**

В.Т. ЕРОФЕЕВ, Т.Ф. ЕЛЬЧИЩЕВА, М.В. МАКАРЧУК

V.T. EROFEEV, T.F. ELCHISHCHEVA, M.V. MAKARCHUK

(Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева,
Тамбовский государственный технический университет)

(National Research Mordovia State University named after N.P. Ogarev,
Tambov State Technical University)

E-mail: al_rodin@mail.ru; elschevat@mail.ru; energ-lab@yandex.ru

Исследования по применению терморезистивных полимеров в аддитивной технологии показывают потенциал их применения с более высокими физико-механическими показателями за счет включения в состав материала конструкционных и функциональных наполнителей. Такие материалы с успехом могут использоваться в текстильной промышленности при изготовлении пресс-форм для получения различных изделий, что позволяет экономить значительные средства. Проведены исследования наноструктурного углеродного материала в качестве наполнителя эпоксидной основы для обеспечения технологических свойств, необходимых при 3D-печати. Изучены физико-механические свойства композитов. Получены рациональные составы композитов на основе эпоксидной смолы с наноструктурными углеродными волокнами и дисперсным наполнителем (наноглиной) для применения в аддитивной технологии при изготовлении пресс-форм. Прочность на изгиб образцов из разработанного композита сопоставима с прочностью литой чистой эпоксидной смолы (около 80 МПа), что свидетельствует о большом потенциале применения разработанного материала при 3D-печати для изготовления конструктивных элементов различного назначения.

Studies on the use of thermosetting polymers in additive technology show the potential for their use with higher physical and mechanical properties due to the inclusion of structural and functional fillers in the composition of the material. Such materials can be successfully used in the textile industry in the manufacture of molds for various products, which allows significant savings. Studies have been carried out on a nanostructured carbon material as an epoxy base filler to provide the technological properties required for 3D printing. The physico-mechanical properties of the composites have been studied. Rational compositions of composites based on epoxy resin with nanostructured carbon fibers and a dispersed filler (nanoclay) for use in additive technology in the manufacture of molds have been obtained. The bending strength of samples from the developed composite is comparable to the strength of cast pure epoxy resin (about 80 MPa), which indicates a great potential for the use of the developed material in 3D printing for the manufacture of structural elements for various purposes.

Ключевые слова: аддитивные технологии, полимерные материалы, эпоксидный композит, пресс-форма, углеродные наноструктуры, 3D-печать, физико-механические показатели, наполнители для полимеров, термореактивные смолы.

Keywords: additive technologies, polymer materials, epoxy composite, press form, carbon nanostructures, 3D printing, physical and mechanical properties, fillers for polymers, thermosetting resins.

Введение

Исследования в области аддитивных технологий с применением композитов на основе полимеров в последние годы вызывают активный интерес у группы исследователей [1...4]. Методологии расчета и прогнозирования свойств композиционных материалов посвящены многочисленные работы [5...16]. Основной задачей в аддитивной технологии является разработка новых композитных материалов с улучшенными физико-механическими и технологическими свойствами. Для изготовления полимерных композиционных материалов используются термопластичные и термореактивные связующие. При создании термопластичных композитов исследователи решают проблему низких физико-механических показателей таких распространенных полимеров, как акрилонитрил-бутадиенстирол $C_{15}H_{17}N$ (ABS), полилактид $C_3H_6O_3$ (PLA) и др. Например, изделия, напечатанные на 3D-принтере из термопластических материалов, обладают слабой связью между отдельными слоями [17...19]. При этом указанная связь может снижаться при добавлении волокон и других конструкци-

онных наполнителей [17], [18]. Кроме того, FDM-технологии присуще коробление готовых изделий вследствие температурных градиентов и напряжений, возникающих во время 3D-печати [20], [21].

В последнее время наблюдается значительное улучшение физико-механических характеристик термопластичных материалов, применяемых в аддитивных технологиях. Однако термореактивные полимерные материалы являются более перспективными в качестве исходных материалов для аддитивной технологии. Это связано с их высокой прочностью, жесткостью, химической стойкостью, термическими свойствами и совместимостью с существующими конструкционными и функциональными наполнителями [22...26]. Термореактивные полимерные материалы могут применяться в текстильной промышленности в качестве материалов для пресс-форм при изготовлении различных изделий. Это представлено в следующих материалах: "Патент СССР № 169252. Эпоксидно-графитовая смесь для изготовления пресс-форм, 1965 г." и "Патент РФ №2604285 Способ изготовления пресс-формы из мате-

риала с термостойкой полимерной матрицей, 2016 г.". Такие пресс-формы имеют весьма низкую стоимость по сравнению с традиционными, изготавливаемыми из алюминия, что важно для производства малых серий изделий [27]. Различные виды таких изделий могут быть весьма перспективны в практике использования в швейном производстве [28].

Разработка термореактивного материала для аддитивной технологии находится в самом начале, но приведенные выше наименования материалов показывают пример большого потенциала для создания новых полимеров, которые позволяют выполнять 3D-печать высокопрочных многофункциональных компонентов и устройств.

Технология 3D-печати подразумевает использование сопла с ограниченным диаметром, что предъявляет ряд требований к применяемому исходному материалу в части нужных реологических свойств и соотношения геометрических размеров наполнителя в связующем с диаметром сопла.

Особенностью термореактивного материала для аддитивной технологии является повышение требований к наполнителям, которые выполняют двойную роль, придавая как желаемые реологические свойства материалу при 3D-печати, так и требуемые физико-механические свойства напечатанному отвержденному изделию.

Наиболее часто для регулирования свойств в качестве многофункционального загустителя эпоксидного композита, применяемого для 3D-печати, используют диоксид кремния [25...29] или наноглину [22], [26]. В данной работе была исследована возможность использования полученного авторами ранее углеродного наноструктурного материала (УНСМ) с высоким коэффициентом формы, в виде трубок, скрученных из пластинок [29].

Разработан композит [26] на основе эпоксидной смолы с заполнением коротким углеродным волокном и наноглиной. Авторы работы [24] изготовили образцы с модулем упругости до 57 ГПа вдоль направления печати образцов и прочностью до 100 МПа – поперек направления печати образ-

цов (температура стеклования полимера составляла до 160°C).

В то же время обнаружено, что композит, содержащий только УНСМ, не обладает достаточно высоким пределом текучести при сдвиге для обеспечения возможности 3D-печати объектов [29...32]. Предварительные исследования показали, что добавление небольшого количества наноглины устраняет этот недостаток. Оптимизация состава эпоксидного композита, содержащего в своем составе в качестве наполнителя одновременно наноструктурный углерод и наноглину по реологическим и физико-механическим свойствам, дает возможность применения разработанного композита для 3D-печати.

Целью работы является исследование и разработка состава эпоксидного композита, эффективного для изготовления изделий методом 3D-печати. В процессе исследования было необходимо решить следующие задачи.

1. Обосновать эффективность использования в качестве наполнителя в эпоксидных композициях наноструктурных углеродных волокон и дисперсной наноглины.

2. Провести исследования композитов, а именно выявить влияние скорости сдвига на динамическую вязкость, использованную в работе в качестве вяжущего, эпоксидной смолы марки DER -330 и изучить с помощью электронного микроскопа структуру углеродного наноструктурного материала.

3. Выявить влияние количественного содержания углеродного наноструктурного материала и наноглины на динамическую вязкость полимерных композиций.

4. Получить зависимости изменения эффективной вязкости и скорости сдвига полимерных композиций от количественного содержания добавок углеродного наноструктурного материала и наноглины.

5. Исследовать прочность при изгибе и модуль упругости литых и послойно сформированных образцов.

Материалы и методы

В качестве материалов для исследования использовались: эпоксидная смола DER-330 (диглицидиловый эфир бисфе-

нола А, DGEBA); медленный отвердитель FCH-S, произведенные фирмой The Dow Chemical Company (Германия); полученный авторами [29] углеродный наноструктурный материал (УНСМ) в виде трубок, скрученных из пластинок; наноглина, в виде пластинок Garamite 7305 (ВУК, Германия) – для введения в композит с целью дальнейшего изменения реологических свойств эпоксидной смолы и улучшения характеристик композита для 3D-печати.

Компоненты смешивались с использованием магнитной мешалки MSH-300 (Biosan, Латвия). Все составы содержали 10,0 г смолы и 3,3 г отвердителя. В работающий смеситель с эпоксидной смолой поочередно добавлялись отвердитель, УНСМ и наноглина. Длительность перемешивания каждого компонента составляла 2 мин, что позволило обеспечить получение однородной смеси.

Структура УНСМ исследовалась с помощью электронного микроскопа ЭМВ-100А (ОАО "SELMI", Украина).

Реологические свойства составов измерялись при нормальных условиях окружающей среды с использованием ротационного вискозиметра REOTEST RV2.1 (VEB MLW, Германия) с рабочим узлом "цилиндр–цилиндр" в диапазоне концентраций 0,5...20,0%. Диапазон скорости сдвига составлял 0,3...1312 с⁻¹.

Полученные композиции загружались в цилиндрические шприцы объемом 10 см³. Для удаления пузырьков воздуха, которые могли попасть в шприцы в процессе загрузки материала, они помещались на поверхность вибропривода ВП-30Т (производство завода "ВИБРОТЕХНИК", Россия) на 5 мин.

Образцы изготавливались в силиконовых формах двумя способами. При первом способе изготовления на шприцы устанавливали наконечники с диаметром сопла 1,067 мм, затем производилось послойное формирование образцов из композиций непосредственно в форме. Второй способ заключался в отливании композитных составов в формы.

Проверка работоспособности технологии 3D-печати проводилась на принтере

FlyingBear Ghost 5 (Китай) при помощи устройства, представленного на рис. 1 (автоматический шприцевой дозатор, установленный на 3D-принтер: а – устройство автоматического шприцевого дозатора (<https://www.thingiverse.com/thing:482873/makes>); б – опытный образец (состав: 15% УНСМ; 2% наноглина) для испытаний на изгиб; в – микроскопическая структура образца; г – укладка материала в образце). Настройки параметров печати производились в программе Cura экспериментальным путем.

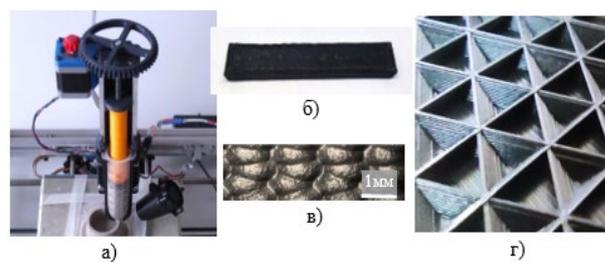


Рис. 1

Образцы обоих видов выполнялись с размерами 61×12×3,2 мм. Твердение образцов проходило в сушильном шкафу ШСУ-М1 (производство НПО Лаборкомплект, Россия) в два этапа при двух температурных режимах: сначала – в течение 24 ч при 100°С, затем – в течение 2 ч при 220°С.

Перед проведением измерений образцы очищались ацетоном. Проводились испытания трех образцов каждого состава. Испытания на изгиб выполнялись при комнатной температуре на универсальной испытательной машине УТС 101-5-1-У (производство ТЕСТСИСТЕМЫ, Россия). В соответствии с ГОСТ Р 56810-2015 "Композиты полимерные. Метод испытания на изгиб плоских образцов" регламентируются размеры пролета образца в зависимости от его толщины. При толщине, большей 1,6 мм, пролет между опорами должен быть в 16 раз больше толщины образца (допуск ±1 раз). Поэтому при испытании на изгиб размер пролета между опорами принимался 51 мм, а скорость ползуна – 1,3 мм/мин.

Для обработки результатов измерений применялись стандартные методы математической статистики.

Результаты и обсуждения

Основные сведения об углеродном наноструктурном материале приведены в работах [26], [29]. На рис. 2 представлено фото углеродного наноструктурного материала (УНСМ), полученное при помощи электронного микроскопа при увеличении 40000X.

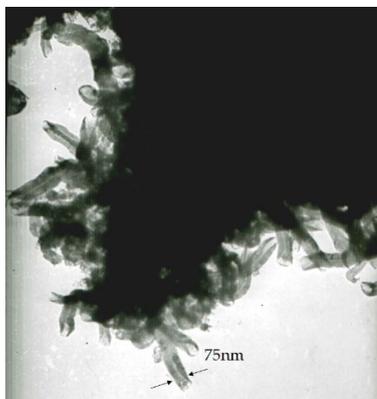


Рис 2

Углеродный наноструктурный материал представляет собой однослойные скрученные нанотрубки диаметром ≈ 75 нм и длиной ≈ 300 нм, полученные осаждением в вакууме атомарного углерода на медную подложку. По данной технологии синтезируются свернутые нанотрубки с оборванными энергетическими связями по краю плоскости, образующей трубки.

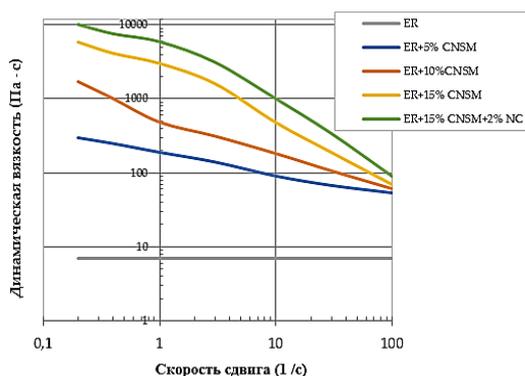


Рис. 3

Для оценки перспективы выполненных исследований предварительно были проведены реологические измерения для чистой эпоксидной смолы и смеси, содержащей смолу и 10 % УНСМ. График зависимости динамической вязкости от скорости сдвига

для образцов показан на рис. 3 (графики зависимости динамической вязкости от скорости сдвига для эпоксидной смолы (ER) без добавок и для смолы, содержащей различное количество УНСМ (CNSM) и наноглины (NC)).

Как видно из рис. 3, динамическая вязкость чистой смолы практически не зависит от скорости сдвига, что указывает на ее, преимущественно, ньютоновское поведение при исследовании.

Вязкость полимерной композиции изменяется под воздействием вводимого отвердителя. На определенной стадии процесса жидкость становится вязкотекучей, потом высокоэластической и, наконец, приобретает свойства твердого тела. Продолжительность формирования каждой системы в эпоксидном материале, в основном, определяется скоростью протекания химических процессов.

В зависимости от вида и условий формирования изделий при аддитивных технологиях требуются композиции различных консистенций: жидкие, вязкие, пастообразные. Вышеуказанные переходы в реологических состояниях осуществляются посредством введения растворителей и наполнителей. Наполненные составы по своему реологическому поведению существенно отличаются от ньютоновских жидкостей. Известно, что наиболее типичными в этом случае являются пластические и псевдопластические течения.

Дальнейшие исследования проводились для образцов с содержанием УНСМ в композите – 5, 10 и 15 % по массе. Добавление УНСМ привело к увеличению вязкости при всех исследованных скоростях сдвига. Графики зависимости динамической вязкости от скорости сдвига представлены на рис. 3. Динамическая вязкость при скорости сдвига $2 \cdot 10^{-2}$ 1/с для различных составов составила соответственно: $8 \cdot 10^2$ Па·с при добавке 5 % по массе УНСМ; $8 \cdot 10^3$ Па·с при добавке 10% по массе УНСМ; $2 \cdot 10^4$ Па·с при добавке 15 % по массе УНСМ. Как видно, разжижение при сдвиге увеличивалось с увеличением содержания УНСМ. Однако динамическая вязкость при скоростях сдвига, характерных для тех, которые

испытывают композиты во время экструзии при 3D-печати (~50 л/с), увеличивалась при добавке в образец УНСМ в количестве 5 % по массе, только с 60 Па·с до 100 Па·с – для образцов с добавкой УНСМ 15 % по массе.

Добавление 15% по массе УНСМ вместе с 2% по массе наноглины увеличивало динамическую вязкость при всех скоростях сдвига, но не влияло на свойства разжижения при сдвиге. Положительным результатом является значительное увеличение текучести при сдвиге. При этом не требуется чрезмерного рабочего давления при выдавливании материала из шприца, что позволяет наносить вязкий композит через тонкие сопла.

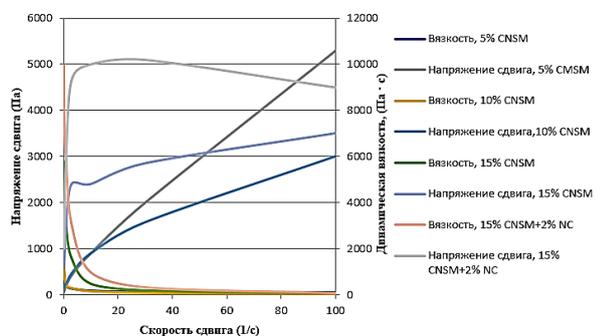


Рис. 4

Изменение напряжения сдвига в зависимости от скорости сдвига показано на рис. 4 (графики зависимости эффективной вязкости и скорости сдвига от напряжения сдвига для смолы, содержащей различное количество УНСМ (CNSM) и наноглины (NC)). Данные графики позволяют понять, насколько полно будет сохранять свою форму изделие после нанесения композита по аддитивной технологии. При содержании 5 % УНСМ, а также 10 % УНСМ напряжение сдвига линейно возрастает с ростом скорости сдвига, что указывает на то, что эти составы демонстрируют поведение, подобное жидкости. Однако состав с 15 % УНСМ показал предел текучести при сдвиге 500 Па. При напряжениях ниже предела текучести этот состав демонстрирует твердые свойства, которые необходимы для аддитивной технологии. Поэтому дальней-

шие исследования проводили с данным составом. Добавление к этому составу 2% наноглины значительно увеличило предел текучести материала – до 1000 Па.

Результаты испытания образцов на изгиб приведены на рис. 5 (модуль упругости и прочности при изгибе литых и послойно сформированных образцов).

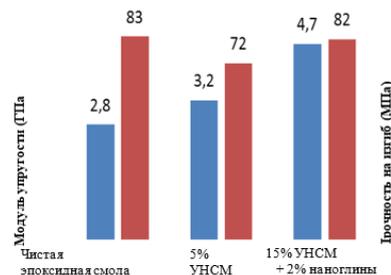


Рис. 5

Из рис. 5 следует, что литая чистая эпоксидная смола имеет модуль упругости при изгибе 2,8 ГПа и прочность на изгиб 83,0 МПа. Отлитые образцы с добавкой 5 % по массе УНСМ показали модуль упругости при изгибе 3,2 ГПа и прочность на изгиб 72,0 МПа. Эти показатели отличаются соответственно на 50,0 и (-13,3) %, от показателей образцов из чистой смолы. При послойном формировании образцов композит с содержанием 15 % по массе УНСМ и 2 % по массе наноглины показал модуль упругости при изгибе 4,7 ГПа и прочность на изгиб 82,0 МПа. Эти показатели отличаются соответственно на 100,0 и (-1,2) % от показателей образцов из чистой смолы, изготовленных методом литья.

ВЫВОДЫ

В работе изучено влияние добавки УНСМ на реологические свойства композиций, изготовленных на основе эпоксидной смолы и отвердителя, а также смесей, состоящих из эпоксидной смолы, отвердителя и наноглины. Исследования позволили выявить составы композитов, которые могут применяться в аддитивной технологии для изготовления пресс-форм, применяемых в текстильной промышленности для изготовления различных изделий. Резуль-

таты показывают, что углеродный наноструктурный материал улучшает свойства композиций, что позволяет его использовать в качестве модификатора для регулирования характеристик эпоксидной смолы и применять ее для 3D-печати. Выявлено, что использование в качестве модификатора только УНСМ недостаточно для того, чтобы композит можно было применять для 3D-печати изделий большого размера. Этот недостаток компенсируется добавлением в состав композиции 2% по массе наноглины, благодаря которой увеличивается предел текучести композита при сдвиге, что позволяет печатать изделия больших размеров. Прочность образцов, изготовленных по аддитивной технологии из разработанного композита, сопоставима с прочностью образцов, изготовленных методом литья.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Parandoush P., Lin D.* A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites // *Composite Structures.* – 2017, №182. P. 36...53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.08.088>.
2. *Hofstetter T., Pedersen D.B., Tosello G., Hansen H.N., Reinf J.* State-of-the-art of fiber-reinforced polymers in additive manufacturing technologies // *Journal of Reinforced Plastics and Composites.* – 2017, 36(15). P. 1061...1073. DOI:10.1177/0731684417695648.
3. *Farahani R.D., Dubé M., Therriault D.* Three-dimensional printing of multifunctional nanocomposites, manufacturing techniques and applications // *Advanced Materials.* – 2016, 28, P. 5794...5821. <https://doi.org/10.1002/adma.201506215>.
4. *Wang X., Jiang M., Zhou Z., Gou J., Hui D.* 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective // *Composites. Part B: Engineering.* – 2017, 110(1). P. 442...458. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.
5. *Балашов А.Б.* Методология расчета свойств композиционных материалов на основе 3D-тканых структур с использованием воксельного подхода // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* – 2021, № 4. С. 195...203. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_4_195.
6. *Черунова И.В., Сирота Е.Н., Таипулатов С.Ш., Махмудова Г.И., Зуфарова З.У., Черунов П.В., Сабирова З.А.* Исследование влияния пористости на теплопроводность однослойных вспененных материалов типа "Неопрен" // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* – 2021, № 3. С.75...80. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_3_75.
7. *Бобрышев А.Н., Ерофеев В.Т., Козомазов В.М.* Физика и синергетика дисперсно-неупорядоченных конденсированных композитных систем. – СПб.: Наука, 2012.

8. *Гусев Б.В., Кондращенко В.И., Маслов Б.П., Файвусович А.С.* Формирование структуры композиционных материалов и их свойства. – М.: Научный мир, 2006.
9. *Кристенсен Р.М.* Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982.
10. *Промышленные полимерные композиционные материалы / Пер. с англ. / Под ред. П.Г. Бабаевского.* – М.: Химия, 1980.
11. *Белов В.В., Бобрышев А.Н., Ерофеев В.Т., Максимова И.Н., Меркулов Д.А.* Компьютерное моделирование и оптимизирование составов композиционных строительных материалов. – М.: Изд-во АСВ, 2015.
12. *Ванин Г.А.* Микромеханика композиционных материалов. – Киев: Наукова думка, 1985.
13. *Eroffeev V., Tyuryakhin A., Tyuryakhina T.* Flat space of values of volume module of grain composite with spherical fill-lem // *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET).* – 2019, 8. P.333...342.
14. *Ерофеев В.Т., Тюряхин А.С., Тюряхина Т.П.* Система упорядоченных подмножеств значений объемного модуля полидисперсных композитов со сферическими включениями. Строительные материалы и изделия // *Изв. вузов. Строительство.* – 2019, № 6. С. 5...17.
15. *Ерофеев В.Т., Тюряхин А.С., Тюряхина Т.П., Тиньгаев А.В.* Эффективные модули двухфазных строительных композитов с зернистым наполнителем. Расчет и проектирование строительных конструкций // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.* – 2019. Т. 15, № 6. С.407...414.
16. *Ерофеев В.Т., Тюряхин А.С., Тюряхина Т.П.* Множества вилок Фойгта–Рейса и трезубцев Фойгта–Рейсса. Расчет и проектирование строительных конструкций // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.* – 2020. Т.16, № 5. С. 323...333.
17. *Duty C.E., Kunc V., Compton B., Post B., Erdman D., Smith R., Lind R., Lloyd P., Love L.* Structure and mechanical behavior of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) materials // *Rapid Prototyping Journal.* – 2017, 23(1), P. 181...189. <https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2015-0183>.
18. *Kishore V., Ajinjeru C., Nycz A., Post B., Lindahl J., Kunc V., Duty C.* Infrared preheating to improve interlayer strength of big area additive manufacturing (BAAM) components // *Additive Manufacturing.* – 2017, №14. P. 7...12. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.11.008>.
19. *Sun Q., Rizvi G., Bellehumeur C., Gu P.* Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments // *Rapid Prototyping Journal.* – 2008, 14. P. 72...80. <https://doi.org/10.1108/13552540810862028>.
20. *Compton B.G., Post B.K., Duty C.E., Love L., Kunc V.* Thermal analysis of additive manufacturing of large-scale thermoplastic polymer composites // *Additive Manufacturing.* – 2017, 17. P. 77...86. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.07.006>.
21. *Love L.J., Kunc V., Rios O., Duty C.E., Elliott A.M., Post B.K., Smith R.J., Blue C.A.* The importance of carbon fiber to polymer additive manufacturing

// Journal of Materials Research. – 2014, 29(17). P.1893...1898. DOI:10.1557/jmr.2014.212.

22. Compton B.G., Kemp J.W., Novikov T.V., Pack R.C., Nlebedim C.I., Dut, C.E., Rios O., Paranthaman M.P. Direct-Write 3D-Printing of NdFeB Bonded Magnets // Materials and Manufacturing Processes. – 2016, 33(6). P. 109...113. <https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1221097>.

23. Farahani R.D., Dali, H., Borgne V.L., Gautier L.A., Khakani M.A. El., Levesque M., Therriault D. Direct-write fabrication of freestanding nanocomposite strain sensors // Nanotechnology. – 2012, 23(8). P.085502. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/8/085502>.

24. Invernizzi M., Natale G., Levi M., Turri S., Griffini G. UV-assisted 3D printing of glass and carbon fiber-reinforced dual-cure polymer composites // Materials, – 2016, 9(7). P. 583. <https://doi.org/10.3390/ma9070583>.

25. Lewicki J.P., Rodriguez J.N., Zhu C., Worsley M.A., Wu A.S., Kanarska Y., Horn J.D., Duoss E.B., Ortega J.M., Elmer W., Hensleigh R., Fellini R.A., King M.J. 3D-Printing of Meso-structurally Ordered Carbon Fiber/Polymer Composites with Unprecedented Orthotropic Physical Properties // Scientific Reports. – 2017, 7. P. 43401. <https://doi.org/10.1038/srep43401>.

26. Malek S., Raney J.R., Lewis J.A., Gibson L.J. Lightweight 3D cellular composites inspired by balsa // Bioinspiration & Biomimetics, – 2017, 12(2). P. 026014. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/aa6028>.

27. Коновалова О.Б., Минец В.В., Бокова Е.С., Костылева В.В., Белицкая О.А. Полимерные материалы для 3D-печати и возможность их применения в обувном производстве: ассортимент пластмасс инновационной функциональности // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021, №5. С. 262...267. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_5_262.

28. Белько Т.В., Курбатова М.А. Дизайн одежды на основе технологии 3D-печати (FDM) // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021, № 3. С. 170...175. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_3_170.

29. Korolev A.P., Makarchuk M.V., Dutov M.N., Loskutova A.D., Firsova A.V. Studying the Regimes of Forming Carbonic Nano-Objects on Copper Island Structure // XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – 2018. P. 36...38. DOI: 10.1109 / APEIE.2018.8545282.

30. Dinkgreve M., Paredes J., Denn M.M., Bonn D. On different ways of measuring “the” yield stress // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. – 2016, 238. P. 233...241. DOI:10.1016/J.JNNFM.2016.11.001.

31. Erofeev V.T., Elchishcheva T.F., Preobrazhenskaya E.M., Makarchuk M.V., Afonin V.V. Optimization of the Strength Characteristics of the Cellular Structure in Samples of Thermoplastic Polyester // International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures 21-22 May 2019, Ural Federal University, 19 Mira Street, Ekaterinburg, Russian Federation. Accepted papers received: 21 October 2020. Published online: 21 November 2020. SPCECI 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020, 972. P. 012056. doi:10.1088/1757-899X/972/1/012056.

32. Erofeev V.T., Elchishcheva T.F., Preobrazhenskaya E.M., Makarchuk M.V. Research of new materials

and approaches in additive technologies in the manufacture of prototypes in industrial design // International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures 21-22 May 2019, Ural Federal University, 19 Mira Street, Ekaterinburg, Russian Federation. Accepted papers received: 21 October 2020. Published online: 21 November 2020. SPCECI 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020, 972. P. 012057. doi:10.1088/1757-899X/972/1/012057.

REFERENCES

1. Parandoush P., Lin D. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites // Composite Structures. – 2017, №182. P. 36...53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.08.088>.

2. Hofstetter T., Pedersen D.B., Tosello G., Hansen H.N., Reinf J. State-of-the-art of fiber-reinforced polymers in additive manufacturing technologies // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2017, 36(15). P. 1061...1073. DOI:10.1177/0731684417695648.

3. Farahani R.D., Dubé M., Therriault D. Three-dimensional printing of multifunctional nanocomposites, manufacturing techniques and applications // Advanced Materials. – 2016, 28, P. 5794...5821. <https://doi.org/10.1002/adma.201506215>.

4. Wang X., Jiang M., Zhou Z., Gou J., Hui D. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective // Composites. Part B: Engineering. – 2017, 110(1). P. 442...458. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.

5. Balashov A.B. Methodology for calculating the properties of composite materials based on 3D-woven structures using the voxel approach // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2021, No. 4. S. 195 ... 203. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_4_195.

6. Cherunova I.V., Sirota E.N., Tashpulatov S.Sh., Makhmudova G.I., Zufarova Z.U., Cherunov P.V., Sabirova Z.A. Investigation of the influence of porosity on the thermal conductivity of single-layer foamed materials of the Neoprene type // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2021, No. 3. P.75 ... 80. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_3_75.

7. Bobryshev A.N., Erofeev V.T., Kozomazov V.M. Physics and synergetics of dispersed-disordered condensed composite systems. – St. Petersburg: Nauka, 2012.

8. Gusev B.V., Kondrashchenko V.I., Maslov B.P., Faivusovich A.S. Formation of the structure of composite materials and their properties. – M.: Scientific world, 2006.

9. Christensen R.M. Introduction to the mechanics of composites. – M.: Mir, 1982.

10. Industrial polymer composite materials / Per. from English. / Ed. P.G. Babaevsky. – M.: Chemistry, 1980.

11. Belov V.V., Bobryshev A.N., Erofeev V.T., Maksimova I.N., Merkulov D.A. Computer modeling and optimization of compositions of composite building materials. – M.: Publishing house ASV, 2015.

12. Vanin G.A. Micromechanics of composite materials. – Kyiv: Naukova Dumka, 1985.

13. Erofeev V., Tyuryakhin A., Tyuryakhina T. Flat space of values of volume module of grain composite with spherical fill-lem // *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. – 2019, 8. P.333...342.
14. Erofeev V.T., Tyuryakhin A.S., Tyuryakhina T.P. System of ordered subsets of values of the bulk modulus of polydisperse composites with spherical inclusions. *Building materials and products // Izv. universities. Building*. - 2019, No. 6. S. 5 ... 17.
15. Erofeev V.T., Tyuryakhin A.S., Tyuryakhina T.P., Tingaev A.V. Effective modules of two-phase building composites with granular filler. Calculation and design of building structures // *Construction mechanics of engineering structures and structures*. - 2019. V. 15, No. 6. P. 407 ... 414.
16. Erofeev V.T., Tyuryakhin A.S., Tyuryakhina T.P. Sets of Voigt–Reuss forks and Voigt–Reuss tridents. Calculation and design of building structures // *Construction mechanics of engineering structures and structures*. – 2020. V.16, No. 5. S. 323...333.
17. Duty C.E., Kunc V., Compton B., Post B., Erd-man D., Smith R., Lind R., Lloyd P., Love L. Structure and mechanical behavior of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) materials // *Rapid Prototyping Journal*. – 2017, 23(1), P. 181...189. <https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2015-0183>.
18. Kishore V., Ajinjeru C., Nycz A., Post B., Lindahl J., Kunc V., Duty C. Infrared preheating to improve interlayer strength of big area additive manufacturing (BAAM) components // *Additive Manufacturing*. – 2017, №14. P.7...12. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.11.008>.
19. Sun Q., Rizvi G., Belleumeur C., Gu P. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments // *Rapid Prototyping Journal*. – 2008, 14. P.72...80. <https://doi.org/10.1108/13552540810862028>.
20. Compton B.G., Post B.K., Duty C.E., Love L., Kunc V. Thermal analysis of additive manufacturing of large-scale thermoplastic polymer composites // *Additive Manufacturing*. – 2017, 17. P. 77...86. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.07.006>.
21. Love L.J., Kunc V., Rios O., Duty C.E., Elliott A.M., Post B.K., Smith R.J., Blue C.A. The importance of carbon fiber to polymer additive manufacturing // *Journal of Materials Research*. – 2014, 29(17). P.1893...1898. DOI:10.1557/jmr.2014.212.
22. Compton B.G., Kemp J.W., Novikov T.V., Pack R.C., Nlebedim C.I., Dut, C.E., Rios O., Paranthaman M.P. Direct-Write 3D-Printing of NdFeB Bonded Magnets // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2016, 33(6). P.109...113. <https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1221097>.
23. Farahani R.D., Dali, H., Borgne V.L., Gautier L.A., Khakani M.A. El., Levesque M., Therriault D. Direct-write fabrication of freestanding nanocomposite strain sensors // *Nanotechnology*. – 2012, 23(8). P.085502. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/8/085502>.
24. Invernizzi M., Natale G., Levi M., Turri S., Griffini G. UV-assisted 3D printing of glass and carbon fiber-reinforced dual-cure polymer composites // *Materials*, – 2016. 9(7). P. 583. <https://doi.org/10.3390/ma9070583>.
25. Lewicki J.P., Rodriguez J.N., Zhu C., Worsley M.A., Wu A.S., Kanarska Y., Horn J.D., Duoss E.B., Ortega J.M., Elmer W., Hensleigh R., Fellini R.A., King M.J. 3D-Printing of Meso-structurally Ordered Carbon Fiber/Polymers Composites with Unprecedented Orthotropic Physical Properties // *Scientific Reports*. – 2017, 7. P. 43401. <https://doi.org/10.1038/srep43401>.
26. Malek S., Raney J.R., Lewis J.A., Gibson L.J. Lightweight 3D cellular composites inspired by balsa // *Bioinspiration & Biomimetics*, – 2017, 12(2). P.026014. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/aa6028>.
27. Konovalova O.B., Minets V.V., Bokova E.S., Kostyleva V.V., Belitskaya O.A. Polymeric materials for 3D printing and the possibility of their use in shoe production: an assortment of plastics with innovative functionality // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. - 2021, No. 5. S. 262...267. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_5_262.
28. Belko T.V., Kurbatova M.A. Fashion design based on 3D printing technology (FDM) // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. - 2021, No. 3. S. 170 ... 175. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_3_170.
29. Korolev A.P., Makarchuk M.V., Dutov M.N., Loskutova A.D., Firsova A.V. Studying the Regimes of Forming Carbonic Nano-Objects on Copper Island Structure // *XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*. – 2018. P. 36...38. DOI: 10.1109 / APEIE.2018.8545282.
30. Dinkgreve M., Paredes J., Denn M.M., Bonn D. On different ways of measuring “the” yield stress // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. – 2016, 238. P.233...241. DOI:10.1016/J.JNNFM.2016.11.001.
31. Erofeev V.T., Elchishcheva T.F., Preobrazhenskaya E.M., Makarchuk M.V., Afonin V.V. Optimization of the Strength Characteristics of the Cellular Structure in Samples of Thermoplastic Polyester // *International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures 21-22 May 2019, Ural Federal University, 19 Mira Street, Ekaterinburg, Russian Federation*. Accepted papers received: 21 October 2020. Published online: 21 November 2020. SPCECI 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020, 972. P. 012056. doi:10.1088/1757-899X/972/1/012056.
32. Erofeev V.T., Elchishcheva T.F., Preobrazhenskaya E.M., Makarchuk M.V. Research of new materials and approaches in additive technologies in the manufacture of prototypes in industrial design // *International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures 21-22 May 2019, Ural Federal University, 19 Mira Street, Ekaterinburg, Russian Federation*. Accepted papers received: 21 October 2020. Published online: 21 November 2020. SPCECI 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020, 972. P. 012057. doi:10.1088/1757-899X/972/1/012057.

Рекомендована кафедрой архитектуры и градостроительства ТГТУ. Поступила 24.04.22.