

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 620.172, 620.178.746, 539.422.5

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-2-65-70

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ 3D-ПЕЧАТНЫХ КАРКАСОВ,  
НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫМ КОМПАУНДОМ****ГОНЧАРОВА ЮЛИЯ АЛЕКСАНДРОВНА**, научный сотрудникlopatina.julia@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7500-4124>; Researcher ID: ABA-3065-2020; Scopus Author ID: 57207458067

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

**Аннотация.** Технологии трехмерной печати находят применение в изготовлении запасных частей сельскохозяйственной техники. Применение 3D-печати сдерживается ввиду недостаточно высоких механических свойств получаемых деталей, обусловленных плохой адгезией слоев пластика при печати. Для устранения этой проблемы предложено проводить вакуумную пропитку 3D-печатных деталей в эпоксидной смоле. Целью исследований является оценка изменения предела прочности и ударной вязкости пропитанных в полимерном компаунде 3D-печатных конструкций по сравнению с их непропитанными аналогами, а также выявление характера поведения данных свойств в зависимости от структуры 3D-печатного каркаса. Каркасы образцов изготавливались из полилактида на 3D-принтере по технологии FDM с 20-, 33- и 50%-ным заполнением. В процессе печати слои пластика укладывались в продольном и поперечном направлениях относительно оси образца. Последующая пропитка полимерным компаундом осуществлялась в вакуумной камере. В результате испытаний установлено, что при любой геометрии механические свойства пропитанных образцов оказываются выше непропитанных, у пропитанных образцов с различным направлением укладки слоев значительно снижается анизотропия прочностных свойств (коэффициент анизотропии снижается от 2...5,5 до 0,94). Характер разрушения материала – хрупкий. При 3D-печати с увеличением процента заполнения у образцов типа «Вдоль» наблюдается рост механических свойств, у образцов типа «Поперек», напротив, проявляется тенденция снижения механических свойств. Для 3D-печатных конструкций соотношение между пластиком основы и пропитывающим составом рекомендовано как 33:77. Исследованиями показана целесообразность применения методики изготовления 3D-печатных конструкций, пропитанных эпоксидной смолой.

**Ключевые слова:** технический сервис, ремонт, запасные части, аддитивные технологии, FDM-печать, вакуумная пропитка, полимер, механические свойства, изучение изломов.

**Формат цитирования:** Гончарова Ю.А. Исследование механических свойств композиционного материала на основе 3D-печатных каркасов, наполненных полимерным компаундом // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 2. С. 65-70. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-2-65-70>.

© Гончарова Ю.А., 2022



## ORIGINAL PAPER

**STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF A COMPOSITE MATERIAL  
BASED ON 3D-PRINTED FRAMES FILLED WITH POLYMER COMPOUND****YULIA A. GONCHAROVA**, Research Engineerlopatina.julia@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7500-4124>; Researcher ID: ABA-3065-2020; Scopus Author ID: 57207458067Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proezd Str., Bld 5

**Abstract.** 3D printing technologies are used to make spare parts for agricultural machinery. Among other things, the use of 3D printing in this area is restrained due to insufficiently high mechanical properties of the resulting parts, which occurs due to poor adhesion between plastic layers during printing. To eliminate this problem, the author proposes to carry out vacuum impregnation of 3D-printed parts in epoxy resin. The aim of this work is to assess the change in the tensile strength and the impact strength between the 3D-printed polymer samples and the 3D-printed samples impregnated in a polymer compound, as well as to reveal the behavior of these properties depending on the structure of the 3D-printed frame. The frames of the samples were made of polylactide on a 3D printer using the FDM technology with different percentages of filling (20, 33, and 50%). During the printing process, layers of plastic were stacked in longitudinal and transverse directions relative to the sample axis. Subsequent impregnation was carried out in a vacuum chamber. As a result of the tests, it was found that for any geometry the mechanical properties of the impregnated samples are higher than those of the non-impregnated ones, and the anisotropy of the strength properties for the impregnated samples with different directions of layers was found significantly reduced (the anisotropy coefficient decreased from 2-5.5 to 1). The material destruction type is fragile. For samples of the longitudinal type, an increase in mechanical properties is observed with an increase in the percentage of 3D printing filling. On the contrary, samples of the transverse type have a tendency to decrease their level of properties. In this regard, for structures experiencing loads in different directions during operation, it is recommended to use an intermediate ratio between the base plastic and the impregnating composition (33:77%, respectively).

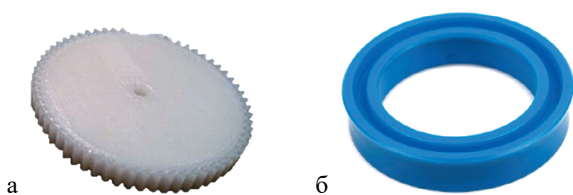
**Key words:** technical service, repair, spare parts, additive technologies, FDM printing, vacuum impregnation, polymer, mechanical properties, fracture studies.

**For citation:** Goncharova Yu.A. Study of mechanical properties of a composite material based on 3D-printed frames filled with polymer compound. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(2): 65-70. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-2-65-70>.

**Введение.** Примерно с середины 80-х гг. прошлого века, после регистрации первого патента на способ трехмерной печати, технологии аддитивного производства начали развиваться лавинообразным образом и прочно вошли в нашу современную жизнь [1, 2]. Развитию направления трехмерной печати способствовал ряд преимуществ перед традиционными технологиями: возможность создания изделий сложной формы без специальной оснастки (литьевых или пресс-форм); более низкая во многих случаях стоимость используемого оборудования; высокая скорость изготовления деталей ввиду отсутствия большого количества технологических операций и переходов; отсутствие необходимости перенастройки оборудования при изменении номенклатуры [3].

Указанные преимущества позволили технологиям трехмерной печати найти применение при ремонте различной техники и оборудования [4-7]. Как показывает практика, зачастую для производителей и дилеров сельскохозяйственной техники оказываются нерентабельными изготовление и продажа запасных частей из полимеров. Вместо них предлагается приобрести целый узел, который на порядки дороже сломанной полимерной детали. Проблемой являются также и большие сроки поставки отдельных деталей или узлов в силу специфики цепочек поставок запасных частей.

На рисунке 1 представлены детали, с заменой которых приходилось сталкиваться производственному кооперативу «Коелгинское» [8]. Предприятие столкнулось с выходом из строя сервопривода на зернотоке во время сушки зерна. В результате износа из строя вышла шестерня (рис. 1а), которая отдельно не продается. Цена нового сервопривода составляет 34 000 руб. Также из строя вышли сальники гидроцилиндров трактора К-744 (рис. 1б), приобрести которые отдельно не получалось.



**Рис. 1. Полимерные детали, вышедшие из строя в производственном кооперативе «Коелгинское»:**

а – шестерня сервопривода зернотока;

б – сальник гидроцилиндра трактора К-744

**Fig. 1. Polymer parts that fail due to wear or breakdown in the “Koelginskoe” production cooperative:**

a – a grain flow servo gear;

b – an oil seal of the hydraulic cylinder of the K-744 tractor

Сроки и стоимость ремонта в случае использования классической цепочки поставок значительно увеличиваются, что негативно отражается на прибыльности сельскохозяйственного предприятия. Применение 3D-печати для изготовления запасных частей сельскохозяйственной техники может в значительной степени снизить материальные и временные затраты, связанные с ремонтом.

Среди факторов, сдерживающих использование аддитивных технологий для изготовления запасных частей сельскохозяйственной техники, можно выделить высокие требования по прочности, предъявляемые к деталям машин, которые не всегда способны обеспечить детали, напечатанные на 3D-принтере. Причина кроется не только в недостаточной прочности наиболее распространенных и доступных материалов, применяемых для печати, но и в особенностях самой технологии, при которой построение детали происходит послойно. При послойном формировании детали возникает вероятность того, что слои не получают достаточного сцепления друг с другом, то есть будет отсутствовать межслойная адгезия. В результате изготовленная деталь будет иметь выраженную анизотропию свойств, при которой максимальная прочность наблюдается вдоль слоя, а поперек (в направлении укладки) прочность значительно ниже [9].

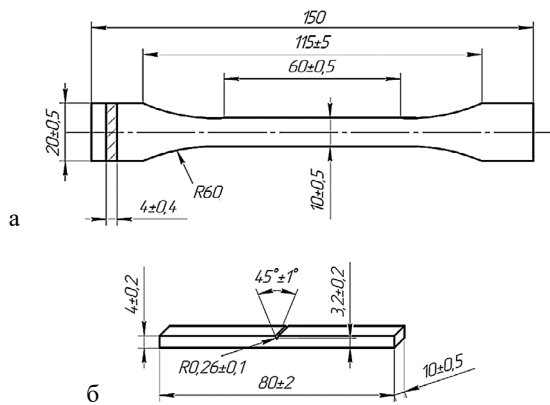
Указанная проблема особенно характерна для получившего наибольшее распространение на сегодняшний день метода FDM-печати (англ. *Fused Deposition Modeling* – моделирование методом послойного наплавления). Основными преимуществами данного метода являются низкая стоимость и широкий ассортимент возможных к использованию материалов, а также относительная простота применяемого оборудования [10, 11].

С целью решения вышеперечисленных проблем предлагается метод упрочнения 3D-печатных конструкций, изготовленных по технологии FDM, с помощью вакуумной пропитки полимерными компаундами.

**Цель исследований:** оценка изменения предела прочности и ударной вязкости пропитанных конструкций по сравнению с непропитанными; выявление характера поведения предела прочности и ударной вязкости в зависимости от структуры композита.

**Материалы и методы.** Процесс изготовления композита включает в себя два последовательных этапа. Первый этап заключается в подготовке 3D-модели изделия, выборе необходимых параметров печати и распечатке модели изделия на 3D-принтере. Полученная модель (каркас) имеет сплошную внешнюю оболочку, но пористую внутреннюю структуру. Второй этап состоит в пропитке распечатанного каркаса в среде полимерного компаунда с помощью вакуумной камеры.

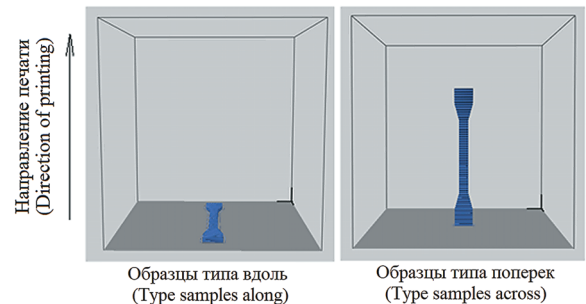
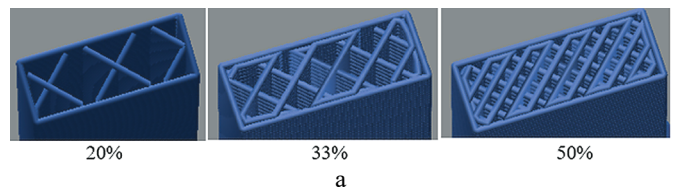
Образцы в данном исследовании имели стандартную форму для испытаний по ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение» и испытаний на ударную вязкость по ГОСТ 4647-2015 «Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи» (рис. 2). Параметры печати образцов варьировались двумя способами: во-первых, изменялся процент заполнения – 20, 33 и 50% (рис. 3а); во-вторых, изменялась ориентация слоев пластика относительно оси образца за счет различного расположения образцов в процессе печати (рис. 3б). Образцы изготавливались на 3D-принтере PICASO 3D Designer X PRO из PLA пластика (полилактид) по режиму, представленному в таблице 1.



**Рис. 2. Образцы для исследования механических свойств композиционного материала:**  
 а – испытания на растяжение (ГОСТ 11262-2017, тип 2);  
 б – испытания на ударную вязкость (ГОСТ 4647-2015, тип 2, надрез В)

**Fig. 2. Samples for studying the mechanical properties of a composite material:**

а – tensile tests (GOST 11262-2017, type 2);  
 б – impact tests (GOST 4647-2015, type 2, notch B)



**Рис. 3. Параметры печати каркасов на 3D-принтере:**

а – процент внутреннего заполнения;  
 б – направление укладки слоев пластика

**Fig. 3. 3D-printing options for frames:**  
 а – filling percentage; б – plastic layers orientation

**Параметры печати образцов на 3D-принтере**

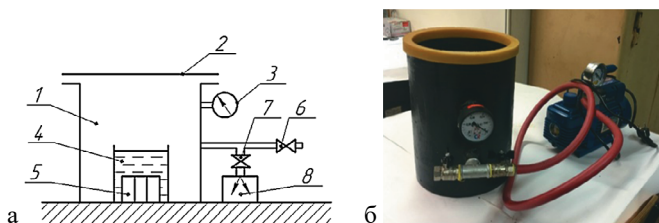
Таблица 1

**Parameters for 3D-printing of samples**

Table 1

Температура сопла, °C / Nozzle temperature, °C	215
Коэффициент обдува, % / Airflow ratio, %	100
Коэффициент подачи пластика, % / Plastic feed ratio, %	98
Высота слоя, мм / Layer height, mm	0,20
Ширина линий, мм / Line width, mm	0,34
Скорость печати периметров/заполнения, мм/с / Perimeter printing/filling speed, mm/s:	
- для образцов типа «Вдоль» / for longitudinal samples	60 / 30
- для образцов типа «Поперек» / for transverse samples	60 / 20

Распечатанные на 3D-принтере каркасы погружались в вакуумную камеру в среду жидкого компаунда и подвергались пропитке (рис. 4). Компаунд представлял собой эпоксидно-диановую смолу с содержанием



**Рис. 4. Схема (а) и внешний вид (б) вакуумной системы, используемой для пропитки образцов:**

- 1 – вакуумная камера; 2 – прозрачная крышка;
- 3 – манометр; 4 – полимерный компаунд;
- 5 – пропитываемые образцы; 6 – клапан выпускной;
- 7 – клапан запорный; 8 – вакуумный насос

**Fig. 4. Scheme (a) and photograph (b) of the vacuum system for sample impregnation:**

- 1 – vacuum chamber; 2 – transparent cover;
- 3 – pressure gauge; 4 – polymer compound;
- 5 – impregnated samples;
- 6 – exhaust valve; 7 – shutoff valve; 8 – vacuum pump

эпоксидных групп не менее 20% (марка ЭД-20) с отвердителем холодного отверждения ПЭПА (полиэтиленполиамин). Последовательность пропитки выглядит следующим образом: образцы помещают в вакуумную камеру в стакан с заранее смешанным в оптимальной пропорции и продегазированным компаундом; далее воздух из камеры откачивается, в результате чего при определенном разряжении из образцов выходит содержащийся внутри воздух через зазоры между слоями пластика, что визуально фиксируется появлением пузырьков в компаунде; при возвращении давления в камеру компаунд устремляется внутрь образца на место образовавшихся внутри деталей областей низкого давления. После завершения пропитки образцы извлекают из среды все еще жидкого компаунда и оставляют отверждаться при комнатной температуре в течение 24 ч.

Для каждого набора факторов (определенного процента внутреннего заполнения и одного из направлений укладки слоев) было изготовлено по три образца как для варианта с пропиткой, так и для варианта без пропитки. Изготовленные образцы были испытаны на растяжение и ударную вязкость согласно требованиям ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания

на растяжение» и испытаний на ударную вязкость по ГОСТ 4647-2015 «Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи». Испытания на растяжение проводились на электромеханической разрывной машине TIME WDW-50E с механическими клиновыми захватами. Скорость нагружения образцов выбиралась в соответствии с требованием ГОСТ таким образом, чтобы испытание длилось не менее 1 мин и составляло для образцов типа «Вдоль» 2 мм/с, для образцов типа «Поперек» – 1 мм/с. Испытания на ударную вязкость проводились на маятниковом копре КМ-0,5 с потенциальной энергией маятника 25 Дж. Дополнительно изломы образцов после испытаний были изучены с помощью бинокулярного микроскопа Olympus SZ61 TR.

**Результаты и обсуждение.** В результате испытаний образцов было установлено, что композит разрушается по хрупкому механизму. Это подтверждается видом диаграммы растяжения, на которой отсутствует площадка текучести (рис. 5), а также внешним видом изломов (рис. 6). Очертания границ изломов не деформировались, сохранили прямоугольную форму, плоскость излома строго перпендикулярна оси образца, что свидетельствует о хрупком механизме разрушения. В связи с этим в качестве прочностной характеристики материала фиксировалось значение показателя предела прочности  $\sigma_b$ , соответствующее напряжению при максимальной нагрузке, предшествующей разрушению образца.

В таблицах 2, 3 представлены результаты испытаний образцов на растяжение. Коэффициент анизотропии рассчитывался как отношение значения прочности образца типа «Вдоль» к значению прочности образца типа «Поперек» при аналогичном проценте заполнения. После пропитки прочность возрастает для любой геометрии образцов, а анизотропия прочностных свойств заметно снижается, что свидетельствует о равномерности прочностных свойств в различных направлениях.

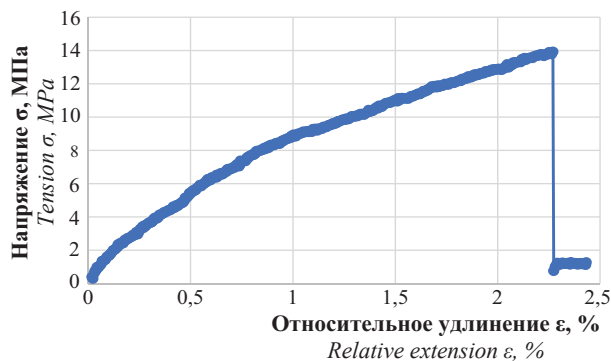


Рис. 5. Типичный вид диаграммы растяжения исследуемых образцов

Fig. 5. Typical view of the tensile diagram of the test samples

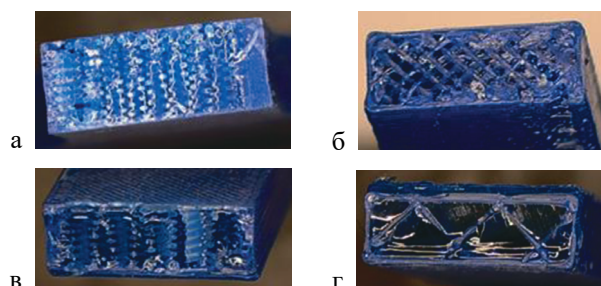


Рис. 6. Изломы образцов композита:

а – испытания на растяжение, образец типа «Вдоль», заполнение 50%; б – испытания на растяжение, образец типа «Поперек», заполнение 50%; в – испытания на удар, образец типа «Вдоль», заполнение 30%; г – испытания на удар, образец типа «Поперек», заполнение 20%

Fig. 6. Fractures of composite samples:

a – tensile tests, longitudinal samples, 50% filling; b – tensile tests, transverse samples, 50% filling; c – impact tests, longitudinal samples, 30% filling; d – impact tests, transverse samples, 20% filling

Таблица 2

Результаты испытаний непропитанных образцов на прочность

Table 2

Strength test results of non-impregnated specimens

Заполнение, % Filling, %	Образцы типа «Вдоль», $\sigma_b$ , МПа Samples of a "longitudinal" type, $\sigma_b$ , MPa	Образцы типа «Поперек», $\sigma_b$ , МПа Samples of a "transverse" type, $\sigma_b$ , MPa	Коэффициент анизотропии Anisotropy coefficient
20	5,50	1,00	5,50
33	10,00	3,00	3,33
50	12,33	6,00	2,06

Таблица 3

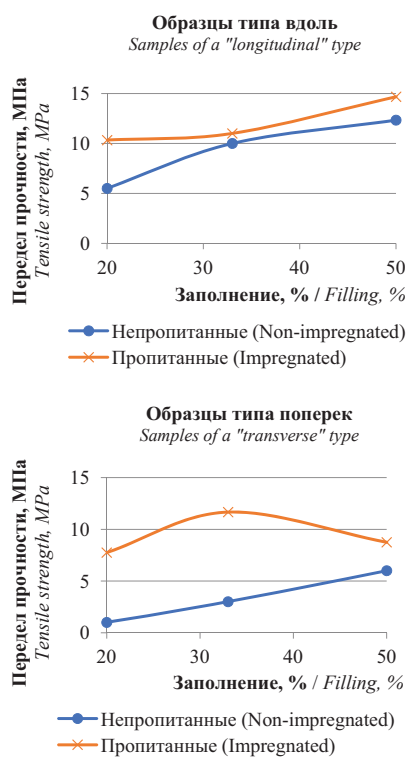
Результаты испытаний пропитанных образцов на прочность

Table 3

Strength test results of impregnated samples

Заполнение, % Filling, %	Образцы типа «Вдоль», $\sigma_b$ , МПа Samples of a "longitudinal" type, $\sigma_b$ , MPa	Образцы типа «Поперек», $\sigma_b$ , МПа Samples of a "transverse" type, $\sigma_b$ , MPa	Коэффициент анизотропии Anisotropy coefficient
20	10,33	7,83	1,32
33	11,00	11,76	0,94
50	14,76	8,75	1,69

На рисунках 7, 8 представлены значения прочности и ударной вязкости пропитанных и непропитанных образцов в зависимости от процента заполнения, рассчитанные как среднее по результатам трёх испытаний, отдельно для образцов с укладкой слоев в процессе печати вдоль оси образца (образцы типа «Вдоль») и для образцов с укладкой слоев поперек оси (образцы типа «Поперек»). При любой внутренней геометрии пропитанные образцы продемонстрировали более высокие механические свойства, чем непропитанные, однако характер зависимостей был различным. Для образцов типа «Вдоль» наблюдается явная тенденция возрастания механических свойств с увеличением процента заполнения, тогда как для образцов типа «Поперек» такой характер свойствен только для непропитанных образцов. Пропитанные образцы имеют максимум прочностных свойств при 33% заполнения и имеют тенденцию уменьшения механических свойств с возрастанием процента заполнения при 3D-печати.



**Рис. 7. Зависимость прочности образцов от процента заполнения**

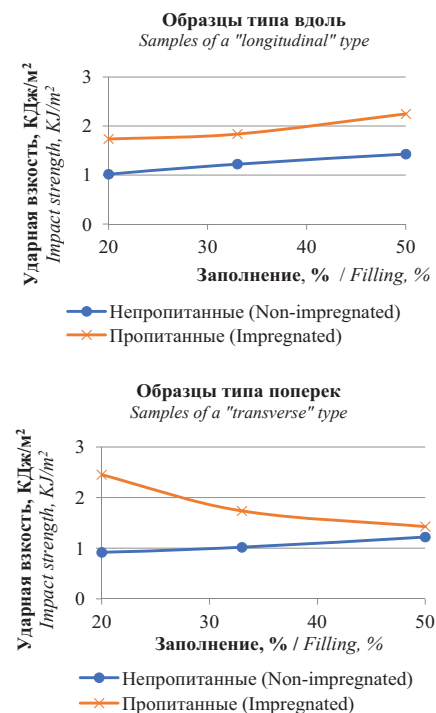
**Fig. 7. Relationship between the tensile strength and the percentage of filling**

Поскольку реальная конструкция, изготовленная методом послойной 3D-печати, будет нести в условиях эксплуатации неоднососные и неоднаправленные нагрузки, в разных частях конструкции одновременно будет иметь место нагружение, соответствующее образцам как типа «Вдоль», так и типа «Поперек».

Таким образом, выбор наиболее оптимального процента заполнения для изготовления конструкций должен определяться с учетом прочностных показателей обоих видов образцов.

Повышение прочностных свойств у образцов типа «Вдоль» и сохранение высоких прочностных свойств у образцов типа «Поперек» позволяют рекомендовать

для 3D-печатных конструкций соотношение между пластиком основы и пропитывающим составом 33:77.



**Рис. 8. Зависимость ударной вязкости образцов от процента заполнения**

**Fig. 8. The dependence of the impact strength on the percentage of filling**

Полученные сведения о характере поведения свойств пропитанных 3D-печатных конструкций уникальны и представляют собой первый подобный опыт. Предложенный способ упрочнения конструкций и знания о закономерностях формирования свойств материала в процессе пропитки позволят направленно регулировать свойства изделий, полученных FDM-печатью, и расширять сферу применения таких изделий.

## Выводы

1. Вакуумная пропитка эпоксидной смолой 3D-печатных полимерных конструкций из полилактида, изготовленных по технологии FDM, положительно влияет на их механические свойства. Значение предела прочности и ударной вязкости для пропитанных образцов возрастает по сравнению с непропитанными.

2. Пропитка положительно повлияла на анизотропию прочностных свойств конструкции: коэффициент анизотропии снизился с 5,5 до 0,94.

3. Характер изменения механических свойств пропитанных образцов в зависимости от процента заполнения является различным. С ростом процента заполнения образцов с укладкой слоев пластика «Вдоль» наблюдается стабильный рост прочности и ударной вязкости. Для образцов с направлением укладки пластика «Поперек», напротив, прочность и ударная вязкость снижаются. Соотношение между пластиком основы и пропитывающим составом рекомендуется на уровне 33:77.

4. Исследованиями показана целесообразность применения методики изготовления 3D-печатных конструкций, пропитанных эпоксидной смолой.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90037.

### Библиографический список

1. Литунов С.Н., Слободенюк В.С., Мельников Д.В. Обзор и анализ аддитивных технологий. Ч. 1 // Омский научный вестник. 2016. № 1(145). С. 12-17.
2. Литунов С.Н., Слободенюк В.С., Мельников Д.В. и др. Обзор и анализ аддитивных технологий. Ч. 2 // Омский научный вестник. 2016. № 5(149). С. 20-24.
3. Attaran M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business horizons*, 2017; 60(5): 677-688. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>
4. Федоренко В.Ф., Голубев И.Г. Перспективы применения аддитивных технологий при производстве и техническом сервисе сельскохозяйственной техники: Научный аналитический обзор. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2018. 140 с.
5. Лопатина Ю.А. Применение 3D-печати методом FDM при ремонте машин и оборудования // Технический сервис машин. 2019. № 3(136). С. 40-45.
6. Свиридов А.С., Тужилин С.П., Лопатина Ю.А. Использование цифровой 3D-фермы в ремонтном производстве сельскохозяйственной техники // Технический сервис машин. 2019. № 1(134). С. 93-99.
7. Нефёлов И.С. Восстановление изношенных деталей машин при помощи дополнительных ремонтных деталей, изготовленных методами аддитивных технологий // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2018. № 11. С. 15-17. <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2018-0-11-15-17>
8. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites part B: Engineering*, 2018; 143: 172-196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
9. Гончарова Ю.А., Денисов В.А. Анализ отказов полимерных деталей сельскохозяйственной техники // Технический сервис машин. 2021. № 3(144). С. 146-154. <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-3-146-154>
10. Bekas D.G., Hou Y., Liu Y., Panesar A. 3D printing to enable multifunctionality in polymer-based composites: a review. *Composites part B: Engineering*, 2019; 179: 107540. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107540>
11. Huang S.H., Liu P., Mokasdar A., Hou L. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International journal of advanced manufacturing technology*, 2013; 67: 1191-1203. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5>

### Критерии авторства

Гончарова Ю.А. выполнила экспериментальные исследования, обработала результаты и на их основании подготовила рукопись. Гончарова Ю.А. имеет на статью авторское право и несет ответственность за плагиат.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 12.08.2021

Одобрена после рецензирования 28.02.2022

Принята к публикации 28.02.2022

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) within the framework of research project No. 19-38-90037.

### References

1. Litunov S.N., Slobodenyuk V.S., Melnikov D.V. Obzor i analiz additivnykh tekhnologiy. Chast' 1 [Review and analysis of additive technologies. Part 1]. *Omskiy Nauchny Vestnik*, 2016; 1(145), 12-17. (In Rus.)
2. Litunov S.N., Slobodenyuk V.S., Melnikov D.V. Obzor i analiz additivnykh tekhnologiy. Chast' 1 [Review and analysis of additive technologies. Part 1]. *Omskiy Nauchny Vestnik*, 2016; 5(149), 20-24. (In Rus.)
3. Attaran M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business horizons*, 2017; 60(5): 677-688. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>
4. Fedorenko V.F., Golubev I.G. Perspektivy primeneniya additivnykh tekhnologiy pri proizvodstve i tekhnicheskome servise sel'skokhozyaystvennoy tekhniki: nauch. analit. obzor. [Prospects for the use of additive technologies in the production and technical service of agricultural machinery: research-and-analytical review]. Moscow, FGBNU "Rosinformagrotekh", 2018. 140 p. (In Rus.)
5. Lopatina Yu.A. Primenenie 3D-pechati metodom FDM pri remonte mashin i oborudovaniya [Application of 3D printing by FDM method for repairing machinery and equipment]. *Tekhnicheskij Servis Mashin*, 2019; 3(136): 40-45. (In Rus.)
6. Sviridov A.S., Tuzhilin S.P., Lopatina Yu.A. Ispol'zovanie tsifrovoy 3D-fermy v remontnom proizvodstve sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Use of digital 3D-farm in the repair of agricultural machinery]. *Tekhnicheskij Servis Mashin*, 2019; 1(134): 93-99 (In Rus.)
7. Nefyolov I.S. Vosstanovlenie iznoshennykh detaley mashin pri pomoshchi dopolnitel'nykh remontnykh detaley, izgotovlennykh metodami additivnykh tekhnologiy [Renewal of worn-out machine parts applying additional repair parts made with additive technology methods]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*, 2018; 11: 15-17. (In Rus.) <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2018-0-11-15-17>
8. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites part B: Engineering*, 2018; 143: 172-196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
9. Goncharova Yu.A., Denisov V.A. Analiz otkazov polimernykh detaley sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Failure analysis of polymer parts of agricultural machinery]. *Tekhnicheskij servis mashin*, 2021; 3(144): 146-154. (In Rus.) <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-3-146-154>
10. Bekas D.G., Hou Y., Liu Y., Panesar A. 3D printing to enable multifunctionality in polymer-based composites: A review. *Composites part B: Engineering*, 2019; 179: 107540. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107540>
11. Huang S.H., Liu P., Mokasdar A., Hou L. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International journal of advanced manufacturing technology*, 2013; 67: 1191-1203. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5>

### Contribution

Yu.A. Goncharova performed experimental studies, processed the results and, based on them prepared the manuscript. Yu.A. Goncharova has author's rights and bears responsibility for plagiarism.

### Conflict of interests

The author declares no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 12.08.2021

Approved after reviewing 28.02.2022

Accepted for publication 28.02.2022