

Качество упрочняющей пропитки 3D-печатных деталей сельскохозяйственной техники

Роман Ярославович Казберов,
 младший научный сотрудник,
 e-mail: kazberov.roman.y@yandex.ru;

Сергей Петрович Тужилин,
 младший научный сотрудник,
 e-mail: sptuzh@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что уровень механических свойств полимерных изделий, изготовленных с помощью традиционных технологий, выше, чем деталей, изготовленных 3D-печатью. Показали актуальность исследования различных способов упрочнения 3D-печатных изделий, например способа вакуумной пропитки в эпоксидных компаундах. (*Цель исследования*) Определить зависимость качества пропитки 3D-печатных деталей сельскохозяйственной техники от вязкости выбранного пропиточного эпоксидного компаунда. (*Материалы и методы*) Изменяли вязкость пропиточного эпоксидного компаунда, добавляя разбавители – ацетон и ДЭГ-1. Для измерения вязкости компаунда использовали ротационный вискозиметр. В качестве объектов пропитки выбрали шестерню привода магнето пускового двигателя трактора МТЗ и опору пальцев шнека жатки John Deere. Детали изготовили на 3D-принтере, работающем по технологии FDM. После пропитки проводили резку изделий в определенных сечениях для оценки наличия непролитых областей. Оценили количество смолы, затвердевшей на поверхности изделий. (*Результаты и обсуждение*) Установили, что ацетон снижает вязкость в 2 раза эффективнее, чем ДЭГ-1. Поскольку стоимость ацетона меньше, последующие эксперименты проводили на нем. Для пропитки деталей сельскохозяйственной техники выбрали три уровня вязкости: высокий, соответствующий исходной вязкости эпоксидного компаунда 16 паскаль-секунд; средний – 8,8 паскаль-секунды, соответствующий введению 0,5 процента (по массе) ацетона; низкий – 6,5 паскаль-секунды, соответствующий введению 1,5 процента (по массе) ацетона. Выявили, что изделия, пропитанные компаундами с высокой и низкой вязкостью, содержали много пор в сечениях и большое количество компаунда на поверхности. (*Выводы*) По результатам пропитки определили лучшую композицию – с вязкостью эпоксидной смолы 8,8 паскаль-секунды, что соответствует содержанию 0,5 процента (по массе) ацетона. Доказали, что повышенная вязкость компаунда не позволяет ему эффективно проникать внутрь детали, при низкой вязкости, напротив, компаунд вытекает из детали после осуществления пропитки.

Ключевые слова: эпоксидные смолы, 3D-печать, вязкость эпоксидного компаунда, динамическая вязкость, АБС-пластик, полимеры.

■ Для цитирования: Казберов Р.Я., Тужилин С.П. Качество упрочняющей пропитки 3D-печатных деталей сельскохозяйственной техники // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №3. С. 48-54. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-48-54. EDN NRZQLS.

The Quality of Strengthening Impregnation of 3D-Printed Parts for Agricultural Machinery

Roman Ya. Kazberov,
 junior researcher,
 e-mail: kazberov.roman.y@yandex.ru;

Sergey P. Tuzhilin,
 junior researcher

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. It is noted that the level of mechanical properties of polymer products manufactured with the help of traditional technologies exceeds that of products made by 3D printing. The relevance of studying various methods of strengthening 3D printed products is shown, for example, the method of vacuum impregnation in epoxy compounds. (*Research purpose*) To determine the dependence between the quality of impregnation of 3D printed parts of agricultural machinery and the viscosity of the impregnating epoxy compound selected. (*Materials and methods*) The viscosity of the impregnating epoxy compound was changed by adding such diluents as acetone and DEG-1. The viscosity of the compound was measured by a rotational viscometer. The magneto drive pinion of the MTZ tractor starting engine and the auger pin support of the John Deere cutter bar were chosen

as the objects for impregnation. The components were produced by a 3D-printer using FDM technology. After impregnation, the products were cut in certain sections to assess the existence of unfilled areas. The amount of resin hardened on the product surface was estimated. (*Results and discussion*) It has been found that acetone reduces viscosity 2 times more efficiently than DEG-1. Since acetone cost is lower, it was used for the subsequent experiments. For the impregnation of agricultural machinery parts, three levels of viscosity were chosen: the high level, corresponding to the 16 pascal-seconds initial viscosity of epoxy compound; the average level of 8.8 pascal-seconds, corresponding to the injection of 0.5 percent of acetone (by weight); the low level of 6.5 pascal-seconds, corresponding to the injection of 1.5 percent acetone (by weight). It was found that products impregnated with high and low viscosity compounds contained many pores in cross sections and a large amount of compound on the surface. (*Conclusions*) Based on the results of impregnation, the best composition proves to be that with the epoxy resin viscosity of 8.8 pascal-seconds corresponding to 0.5 percent of acetone (by weight). It is proved that the higher compound viscosity does not allow it to effectively penetrate into the product, at a lower viscosity, on the contrary, the compound leaks out of the product after impregnation.

Keywords: epoxy resins, 3D printing, epoxy compound viscosity, dynamic viscosity, acrylonitrile butadiene styrene (ABS) plastic, polymers.

■ **For citation:** Kazberov R.Ya., Tuzhilin S.P. Kachestvo uprochnyayushchey propitki 3D-pechatnykh detaley sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [The quality of strengthening impregnation of 3d-printed parts for agricultural machinery]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N3. 48-54 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-48-54. EDN NRZQLS.

Повышение надежности различных механических узлов сельхозтехники, а также обеспечение возможности быстрого ремонта этих узлов, особенно в условиях сезонной работы, остаются важной задачей [1]. Сельскохозяйственные машины сегодня во многом состоят из полимерных деталей. Традиционное производство изделий из полимерных и полимерных композиционных материалов занимает большое количество времени. Зачастую оно требует специальной оснастки, что увеличивает стоимость конечного продукта. Для ускорения и удешевления процесса изготовления полимерных деталей возможно применение аддитивных технологий [2-4].

Наиболее распространенная технология 3D-печати из полимерных материалов – FDM (*fused deposition modeling*). Она представляет собой метод создания детали путем послойного наплавления термопластичного полимера (рис. 1). К ее преимуществам относятся низкая стоимость и большой спектр применяемых материалов, что позволяет получать изделия с различными конечными свойствами. В качестве полимерных материалов применяют следующие их разновидности: ПЛА (полилактид), АБС (акрилонитрил-бутадиен-стирол), ПВХ (поливинилхлорид), ПА (полиамиды), ПК (поликарбонат), ПП (полипропилен) и другие [5, 6].

На сегодняшний день актуален вопрос изготовления 3D-печатных изделий, сопоставимых по свойствам с деталями, произведенными традиционными методами переработки пластмасс. В связи с этим проводятся исследования различных методов, способствующих повышению физико-механических свойств 3D-печатных изделий. К их числу можно отнести материаловедческий метод, заключающийся в разработке новых полимерных композиционных материалов

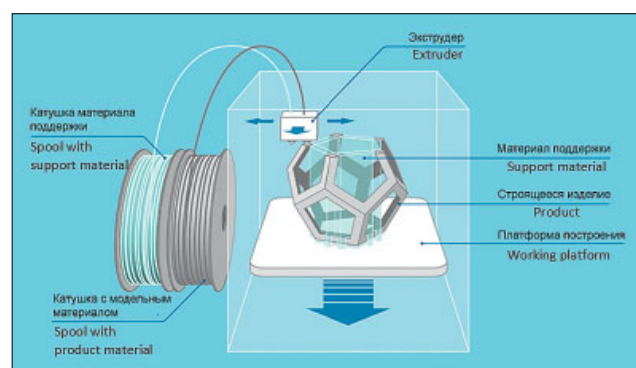


Рис. 1. Общая схема аддитивного полимерного производства
Fig. 1. General diagram of additive polymer production

для 3D-печати [7-9]. Кроме того, существуют различные методы упрочняющей постобработки изделий. Один из них – вакуумная пропитка в полимерных компаундах [10-14].

Цель исследования – определение зависимости качества пропитки 3D-печатных деталей сельскохозяйственной техники от вязкости выбранного пропиточного эпоксидного компаунда.

Материалы и методы. Эпоксидные смолы обладают высоким комплексом прочностных, теплофизических, диэлектрических и адгезионных показателей, что в совокупности с технологическим удобством и экономической выгодой обусловило выбор эпоксидных олигомеров в качестве материала для пропитки 3D-печатных изделий. Вязкость эпоксидной композиции влияет на качество пропитки и количество пустот в конечном изделии. Как показали предыдущие исследования, чтобы улучшить качество пропитки, необходимо снизить вязкость эпоксидной смолы. Для этого использовали наиболее доступные на отечественном рынке разбавители, отно-

сящиеся к двум разным классам: инактивные и активные. Первые не способны химически встраиваться в структуру эпоксидной смолы в процессе отверждения. Поэтому возможно образование пор и микродефектов при испарении разбавителя во время экзотермической реакции отверждения, что снижает прочность материала. Активные разбавители содержат в своей химической структуре функциональные эпоксидные группы, что помогает им встраиваться в структуру отвержденного полимера с образованием химических связей [15-18].

В качестве инактивного разбавителя для эпоксидной смолы марки ЭД-20 выбрали ацетон, в качестве активного – ДЭГ-1 (табл. 1).

Таблица 1 СОСТАВЫ ИССЛЕДУЕМЫХ СМЕСЕЙ COMPOSITION OF MIXTURES UNDER STUDY		
№	Состав Composition	Содержание разбавителя, % по массе Diluent content, % by weight
1	ЭД-20 ER-20	0
2	ЭД-20 + ацетон ER-20+ acetone	0,5
3	ЭД-20 + ацетон ER-20+ Acetone	1,0
4	ЭД-20 + ацетон ER-20+ Acetone	1,5
5	ЭД-20 + ДЭГ-1 ER-20+ DEG-1	2,5
6	ЭД-20 + ДЭГ-1 ER-20+ DEG-1	5,0

Динамическую вязкость измеряли ротационным вискозиметром *Rotavisc lo-vi* со шпинделем *SP-2* (рис. 2).

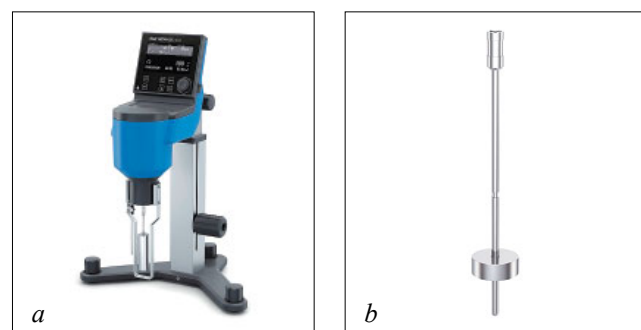


Рис. 2. Оборудование для измерения вязкости: а – ротационный вискозиметр *Rotavisc lo-vi*; б – шпиндель *SP-2*
Fig. 2. Viscosity measurement equipment: a – *Rotavisc lo-vi* rotary viscometer; b – *SP-2* spindle

Смеси подготавливали с помощью лабораторных весов высокой точности *CAS XE 6000*. Навеску разбавителя помещали в массу эпоксидной смолы, тщательно распределяли по всему объему вручную, затем смесь дополнительно перемешивали и вакууми-

ровали в вакуумно-литьевой машине *KLM V400 A*. Убедившись, что в смеси отсутствуют пузыри воздуха, измеряли вязкость в режиме автоматического выбора скорости вращения шпинделя – для обеспечения минимальной погрешности при измерении.

В качестве объектов исследования выбрали шестерню привода магнето пускового двигателя трактора МТЗ и опору пальцев шнека жатки *John Deere* (рис. 3).

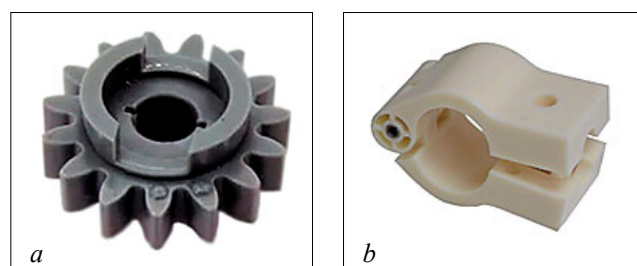


Рис. 3. Шестерня привода магнето (а) и опора пальцев шнека жатки *John Deere* (b)
Fig. 3. Magneto drive pinion (a) and John Deere cutter bar auger pin support (b)

Каркасы опор пальцев шнека жатки изготавливали на 3D-принтере *TotalZ 250 G3*, каркасы шестерней – на 3D-принтере *Flying Bear Ghost 5* в определенном режиме печати (табл. 2). Материалом печати во всех случаях служил пластик *ABS*.

Таблица 2 РЕЖИМ ПЕЧАТИ КАРКАСОВ ОПОР ПАЛЬЦЕВ/ШЕСТЕРНЕЙ ДЛЯ ПРОПИТКИ PRINT MODE FOR IMPREGNATING PIN SUPPORT FRAMES/PINION FRAMES	
Параметры / Parameter	Значение / Value
Количество периметров, шт. Number of perimeters, pcs	2
Заполнение, % Filling, %	33
Тип заполнения Type of filling	сетка grid
Температура сопла, °C Nozzle temperature, °C	240/245
Температура стола, °C Table temperature, °C	100
Скорость печати стенок, мм/с Speed of printing side walls, mm/s	30
Скорость печати заполнения, мм/с Fill print speed, mm/s	40

Процесс пропитки 3D-печатных полимерных изделий состоял из следующих этапов:

- навеска смолы ЭД-20 с помощью лабораторных весов;
- вакуумизация смолы ЭД-20 в камере вакуумно-литьевой машины (рис. 4);
- навеска необходимого количества отвердителя и разбавителя;
- вмешивание в массу эпоксидной смолы отвердите-

- ля и разбавителя с помощью смесителя вакуумно-литьевой машины;
- повторная вакуумизация эпоксидной композиции;
- размещение в объеме эпоксидной композиции 3D-печатных полимерных образцов;
- вакуумизация образцов (3 цикла по 7 мин), между циклами каждый образец переворачивался на противоположную сторону для равномерной пропитки;
- вертикальное подвешивание образцов до полного отверждения эпоксидной смолы.



Рис. 4. Вакуумно-литьевая машина KLM V 400 A

Fig. 4. KLM V 400 vacuum casting machine

После пропитки образцы разрезали с помощью ручного отрезного станка *Labotom-3 Struerus* в соответствии со схемой (рис. 5).

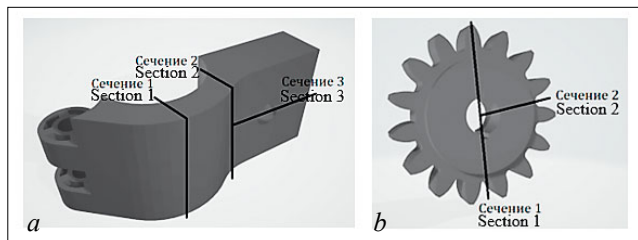


Рис. 5. Схема резки опоры пальца (a) и шестерни (b)

Fig. 5. Diagram of cutting the pin support (a) and pinion (b)

Качество полученных сечений оценивали по наличию непролитых областей и количеству эпоксидной смолы, затвердевшей вдоль стенок детали с внешней стороны.

Результаты и обсуждение. Получили зависимости вязкости эпоксидной смолы ЭД-20 от количества активного и неактивного разбавителей (рис. 6).

Вязкость исследуемой эпоксидной смолы ЭД-20 равна примерно 16 Па·с, что соответствует ее паспортным данным. Ацетон снижает ее примерно в 2 раза эффективнее, чем ДЭГ-1. При одинаковом содержании разбавителей в количестве 0,5 масс. % вязкость смеси с применением ДЭГ-1 составляет около 15 Па·с,



Рис. 6. Зависимость вязкости эпоксидной смолы ЭД-20 от введения различных разбавителей: 1 – ацетон; 2 – ДЭГ-1

Fig. 6 Dependence of viscosity of ED-20 epoxy resin on the injection of different thinners: a – acetone; b – DEG-1

то есть на 6% меньше, тогда как в варианте с ацетоном этот показатель равен 8,7 Па·с, или на 45% ниже.

С повышением содержания неактивного разбавителя (ацетона) его влияние на вязкость снижается. Так, при возрастании в 2 раза (с 0,5 до 1,0 масс. %) значение вязкости составляет уже 7,1 Па·с, что всего на 10% выше, чем при использовании 0,5 масс. % ацетона. Подобный эффект, вероятно, связан с ограниченной растворимостью эпоксидной смолы в ацетоне. Разбавление эпоксидной смолы ацетоном можно описать как процесс ограниченного набухания, то есть процесс взаимодействия олигомерной фракции с низкомолекулярной жидкостью (неактивным разбавителем), иначе говоря, как процесс, ограниченный стадией поглощения низкомолекулярного растворителя олигомерами.

В отличие от ацетона, зависимость вязкости эпоксидной смолы от массового содержания активного разбавителя (ДЭГ-1) линейна. В данном случае процесс представляет собой разбавление олигомерными низкомолекулярными фракциями. Однако этот метод требует большего содержания разбавителя для снижения вязкости до уровня, аналогичного при использовании неактивного разбавителя.

В результате исследования зависимости вязкости эпоксидного компаунда от введения разбавителей решено последующий эксперимент по исследованию качества пропитки полимерных изделий проводить при трех уровнях вязкости: низком, среднем и высоком (табл. 3). Вязкость пропиточного компаунда будет задаваться с помощью ацетона, более доступного в ценовом сегменте.

3D-печатные детали опор пальцев шнека жатки пропитали эпоксидными композициями с разным количеством разбавителя (рис. 7).

В первом варианте, без разбавителя, количество смолы во внутренних полостях изделия мало вследствие достаточно высокой первоначальной вязкости эпоксидной смолы. Все зеленые области находятся вдоль стенок изделия. Также можно отметить доста-

Таблица 3

Table 3

**Композиции для оценки качества пропитки
3D-печатных полимерных изделий**
**COMPOSITIONS FOR ASSESSING THE QUALITY OF IMPREGNATION
OF 3D-PRINTED POLYMER PRODUCTS**

Уровень вязкости Viscosity level	Содержание ацетона, % по массе Mass content of diluent (acetone), %	Вязкость эпоксидной ком- позиции, Па·с Viscosity of the epoxy composition, Pa·s
Высокий / High	0	16
Средний / Middle	0,5	8,8
Низкий / Low	1,5	6,5

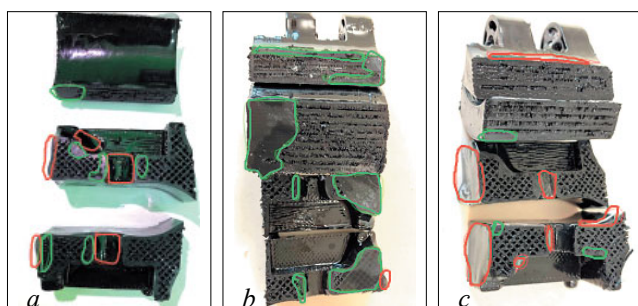


Рис. 7. Сечения 3D-печатных полимерных образцов типа опора пальцев, пропитанных эпоксидными композициями с разным количеством разбавителя, % по массе: а – 0; б – 0,5; с – 1,5 (красным отмечены области с большим количеством отвержденной смолы, не проникшей во внутренние полости изделия; зеленым – пропитанные полости изделия)

Fig. 7. Cross-sections of 3D-printed polymer samples of pin support type impregnated with epoxy compositions containing different amounts of diluent, % by weight: a – 0; b – 0.5; c – 1.5 (red marks show the areas with a large amount of cured resin that has not penetrated into the product internal cavities; green marks show the impregnated product cavities)

точно большое количество эпоксидной смолы, отвержденной на внешних поверхностях изделия.

Второй случай, с добавлением 0,5% ацетона по массе, показывает, что пропитанные области изделия находятся не только по границе стенки изделия, но и проникают вглубь детали, практически достигая середины сечения всей детали.

Третий вариант, с добавлением 1,5% ацетона по массе, характеризуется наименьшим среди всех исследуемых уровней вязкости пропиточных составов количеством эпоксидной композиции, проникшей во внутренние полости детали, а также наибольшим количеством эпоксидной смолы, отвержденной на внешних поверхностях (красные области). Вероятно, полученный эффект стал следствием низкой вязкости, способствующей вытеканию эпоксидной композиции из внутренних полостей изделия во время стадии отверждения.

Эксперимент повторили с образцами типа шестерня (рис. 8). Ни один из них не пропитался эпоксидной композицией. Причина, предположительно, заклю-

чается в повышенной плотности внешних стенок изделия в сравнении с образцами типа опора пальцев. При этом наблюдается схожая закономерность в количестве эпоксидной смолы, отвержденной на внешней поверхности изделия.

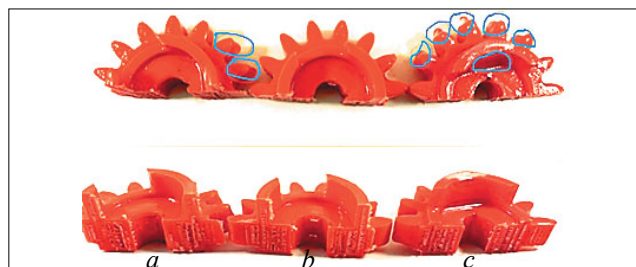


Рис. 8. Сечения 3D-печатных полимерных образцов типа шестерня, пропитанных эпоксидными композициями с разным количеством разбавителя, % по массе: а – 0; б – 0,5; с – 1,5 (синим отмечены области с большим количеством отвержденной смолы, не проникшей во внутренние полости изделия)

Выводы. На основе проведенного анализа 3D-печатных полимерных образцов типа опора пальцев и шестерня, пропитанных эпоксидными композициями с разным количеством разбавителя, можно сделать вывод, что наиболее оптимальна композиция с вязкостью эпоксидной смолы примерно 8,8 Па·с, что соответствует содержанию 0,5% ацетона по массе. Образцы, пропитанные этой композицией, характеризуются наибольшим количеством заполненных внутренних полостей, а также наименьшим количеством смолы, отвержденной на внешних плоскостях детали.

Деталь типа опора пальцев пропиталась значительно лучше, чем шестерня. Необходимо оптимизировать конфигурации изделия при его проектировании с учетом наиболее оптимальной толщины стенки для обеспечения качественной пропитки.

В дальнейшем планируется исследовать зависимость физико-механических свойств пропитанных 3D-печатных образцов от вида и количества используемого разбавителя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В. Перспективы развития методов и технических средств защиты сельскохозяйственных растений // *Агроинженерия*. 2021. N1(101). С. 26-35.
2. Дорохов А.С., Свиридов А.С. Применение аддитивных технологий при техническом сервисе садовой техники // *Агроинженерия*. 2020. N6(100). С. 39-44.
3. Лопатина Ю.А., Свиридов А.С., Плохих А.И. Оценка возможности применения 3D-печати филаментом из вторичного сырья для изготовления деталей сельскохозяйственных машин и оборудования // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2019. N10. С. 58-64.
4. Свиридов А.С., Тузилин С.П., Лопатина Ю.А. Использование цифровой 3D-фермы в ремонтном производстве сельскохозяйственной техники // *Технический сервис машин*. 2019. N1(134). С. 93-99.
5. Лопатина Ю.А. Применение 3D-печати методом FDM при ремонте машин и оборудования // *Технический сервис машин*. 2019. N3(136). С. 40-45.
6. Краснящих К.А., Свиридов А.С. Применение быстрого прототипирования в АПК на примере опор скольжения // *Наука без границ*. 2018. N2(19). С. 51-55.
7. Berretta S., Davies R., Shyng Y.T., Wang Y., Ghita O. Fused Deposition Modelling of high temperature polymers: Exploring CNT PEEK composites. *Polymer Testing*. 2017. Vol. 63. 251-262.
8. Caminero M.A., Chacón J.M., García-Moreno I., Rodríguez G.P. Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 148. 93-103.
9. Caminero M.A., Chacón J.M., García-Moreno I., Reverte J.M. Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Polymer Testing*. 2018. Vol. 68. 415-423.
10. Гончарова Ю.А. Исследование механических свойств композиционного материала на основе 3D-печатных каркасов, наполненных полимерным компаундом // *Агроинженерия*. 2022. N34. С. 65-70.
11. Filippova A.V., Lopatina Y.A., Sviridov A.S. Study of the tensile strength of a polymer composite material based on abs-plastic and impregnated in epoxy resin with different types of hardener. *Journal of physics: conference series*. 2021. 012015.
12. Лопатина Ю.А., Денисов В.А. Исследование пористости композитных конструкций на основе 3D-печатных каркасов, пропитанных эпоксидной смолой // *Технический сервис машин*. 2021. N1(142). С. 131-139.
13. Lopatina Y.A., Slavkina V.E. Development of a high strength polymeric composite material using 3D-printing and vacuum impregnation technology. *IOP Conference series: materials science and engineering*. 2020. 012019.
14. Lopatina Y.A., Filippova A.V. Research of composition porosity based on 3d-printed frames and impregnated with epoxy resin. *IOP Conference series: materials science and engineering*. 2020. 012031.
15. Dev S., Srivastava R. Experimental investigation and optimization of FDM process parameters for material and mechanical strength. *Materials Today: Proceedings*. 2020. 26. S2214785320311901.
16. Воробьев А. Эпоксидные смолы // *Компоненты и технологии*. 2003. N8(34). С. 170-173.
17. Мараховский К.М., Осипчик В.С., Панова Д.Н., Горшкова Е.А., Бичевый Л.С., Повернов П.А. Кинетика отверждения эпоксисинтетических связующих, модифицированных ДЭГ-1 // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2019. N1. С. 17-21.
18. Махин М.Н., Терехов А.В., Дмитриев Г.С., Махина Д.Н., Занавескин Л.Н., Хаджиев С.Н. Композиционные материалы: свойства полимерной матрицы на основе эпоксидной смолы и моноэпоксидного разбавителя – глицидилового эфира п-трет-бутилфенола // *Журнал прикладной химии*. 2018. N5. С. 749-754.

REFERENCES

1. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eshchin A.V. Perspektivy razvitiya metodov i tekhnicheskikh sredstv zashchity sel'skokhozyaystvennykh rasteniy [Development prospects for methods and technical means of farm crop protection]. *Agroinzheneriya*. 2021. N1(101). 26-35 (In Russian).
2. Dorokhov A.S., Sviridov A.S. Primenenie additivnykh tekhnologiy pri tekhnicheskom servise sadovoy tekhniki [Application of additive technologies in the technical service of garden equipment]. *Agroinzheneriya*. 2020. N6(100). 39-44 (In Russian).
3. Lopatina Yu.A., Sviridov A.S., Plokhikh A.I. Otsenka vozmozhnosti primeneniya 3D-pechati filamentom iz vtorichnogo syriya dlya izgotovleniya detaley sel'skokhozyaystvennykh mashin i oborudovaniya [Evaluation of the possibility of using 3d printing filament produced from secondary raw materials for the manufacturing parts for agricultural machinery and equipment]. *Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2019. N10. 58-64 (In Russian).
4. Sviridov A.S., Tuzhilin S.P., Lopatina Yu.A. Ispol'zovanie tsifrovoy 3D-fermy v remontnom proizvodstve sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [The use of digital 3d-farm for use in the repair of agricultural machinery]. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2019. N1(134). 93-99 (In Russian).
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]. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2019. N3(136). 40-45 (In Russian).
6. Krasnyashchikh K.A., Sviridov A.S. Primenenie bystrogo prototipirovaniya v APK na primere opor skol'zheniya [The application of rapid prototyping in agriculture on the example of sliding support]. *Nauka bez granits*. 2018. N2(19). 51-55

- (In Russian).
7. Berretta S., Davies R., Shyng Y.T., Wang Y., Ghita O. Fused Deposition Modelling of high temperature polymers: Exploring CNT PEEK composites. *Polymer Testing*. 2017. Vol. 63. 251-262 (In English).
 8. Caminero M.A., Chacón J.M., García-Moreno I., Rodríguez G.P. Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 148. 93-103 (In English).
 9. Caminero M.A., Chacón J.M., García-Moreno I., Reverte J.M. Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Polymer Testing*. 2018. Vol. 68. 415-423 (In English).
 10. Goncharova Yu.A. Issledovanie mekhanicheskikh svoystv kompozitsionnogo materiala na osnove 3D-pechatnykh karkasov, napolnennykh polimernym kompaundom [Study of mechanical properties of a composite material based on 3D-printed frames filled with polymer compound]. *Agroinzheneriya*. 2022. N34. 65-70 (In Russian).
 11. Filippova A.V., Lopatina Y.A., Sviridov A.S. Study of the tensile strength of a polymer composite material based on abs-plastic and impregnated in epoxy resin with different types of hardener. *Journal of physics: conference series*. 2021. 012015 (In English).
 12. Lopatina Yu.A., Denisov V.A. Issledovanie poristosti kompozitnykh konstruksiy na osnove 3D-pechatnykh karkasov, propitannykh epoksidnoy smoloy [Porosity of composite structures based on 3d-printed frames impregnated with epoxy resin]. *Tekhnicheskij servis mashin*. 2021. N1(142). 131-139 (In Russian).
 13. Lopatina Y.A., Slavkina V.E. Development of a high strength polymeric composite material using 3D-printing and vacuum impregnation technology. *IOP Conference series: materials science and engineering*. 2020. 012019 (In English).
 14. Lopatina Y.A., Filippova A.V. Research of composition porosity based on 3d-printed frames and impregnated with epoxy resin. *IOP Conference series: materials science and engineering*. 2020. 012031 (In English).
 15. Dev S., Srivastava R. Experimental investigation and optimization of FDM process parameters for material and mechanical strength. *Materials Today: Proceedings*. 2020. 26. S2214785320311901(In English).
 16. Vorob'ev A. Epoksidnye smoly [Epoxy resins]. *Komponenty i tekhnologii*. 2003. N8(34). 170-173 (In Russian).
 17. Marakhovskiy K.M., Osipchik V.S., Panova D.N., Gorshkova E.A., Bicheviy L.S., Povernov P.A. Kinetika otverzhdaniya epoksinovolachnykh svyazuyushchikh, modifitsirovannykh DEG-1 [Curing kinetics of epoxy-crosslinked binders modified with DEH-1]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. 2019. N1. 17-21 (In Russian).
 18. Makhin M.N., Terekhov A.V., Dmitriev G.S., Makhina D.N., Zanaevskiy L.N., Khadzhiev S.N. Kompozitsionnye materialy: svoystva polimernoy matritsy na osnove epoksidnoy smoly i monoepoksidnogo razbavitelya - glitsidilovogo efira p-tret-butylfenola [Composite materials: properties of polymeric matrix based on epoxy resin and monoepoxide diluent, p-tert-butylphenol glycidyl ether]. *Zhurnal prikladnoy khimii*. 2018. N5. 749-754 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Казберов Р.Я. – литературный анализ, формулирование основных направлений исследования, написание текста, формирование общих выводов;

Тужилин С.П. – изготовление образцов, обработка результатов исследования, доработка текста.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Kazberov R.Ya. – literature review, formulating the key research concepts, writing the article manuscript, developing the main conclusions;

Tuzhilin S.P. – producing the samples, processing the research results, manuscript revision.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

13.06.2022

08.09.2022