Тип статьи: научная
УДК 621.822.6.004.67: 668.3: 631.3.02
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-7-15

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА 3-D ПЕЧАТИ ТУРБИННОЙ МЕШАЛКИ ДЛЯ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Роман Иннакентьевич Ли [1]***, Мария Романовна Киба*** [2]***,***
Дмитрий Васильевич Гребеньков [3]***, Виктор Евгеньевич Ерохин*** [4]
[1,3,4] *Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия*
[1] romanlee@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-4880-6081
[3]https://orcid.org/0000-0003-3045-7434, [4]https://orcid.org/ 0000-0003-3997-2563
[2] *Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия*
[2] https://orcid.org/0000-0001-9999-8146

Автор, ответственный за переписку: Роман Иннакентьевич Ли, romanlee@list.ru
Corresponding author: Roman Li, romanlee@list.ru

Реферат. *Конструкция турбинной мешалки отличается достаточно сложной формой рабочих поверхностей и при ее изготовлении традиционными способами необходимы уникальные пресс-формы для каждого типоразмера мешалки, требуются повышенные материальные и трудовые затраты. Применение 3D печати позволяет получать изделия со сложной конфигурацией поверхности, с минимальными затратами и которые не требуют в последствии механической обработки. Проведен анализ и осуществлен выбор типа 3D печати и материала турбинной мешалки, предназначенной для смешения компонентов растворов эластомерных нанокомпозитов. Для решения конструкторских и технологических задач при изготовлении турбинных мешалок наиболее подходящим типом 3D печати является FDM (Fused Deposition Modeling). Весьма широкое распространение при данном типе 3D печати получили пластики марок: ABS, PLA и PETG. Наиболее высокие механические свойства, химическую стойкость и наименьшую цену из рассматриваемых материалов имеет пластик PETG, который выбрали для изготовления турбинной мешалки, предназначенной для смешения и диспергирования растворов эластомерных нанокомпозитов. Реализован активный эксперимент по плану* B_2*. Параметром оптимизации выбрали прочность образцов, изготовленных методом 3D печати при различных технологических режимах. Образцы это пластины из пластика PETG, напечатанные на 3D принтере марки Flying Bear Ghost 5. Основными режимными параметрами 3D печати по типу FDM, определяющими прочность образцов и производительность печати являются: количество концентрических линий, составляющих стенку печатаемого изделия и ширина линии. Получена регрессионная модель зависимости прочности образцов, изготовленных из пластика PETG, от количества и ширины линий при 3D печати. Установлен оптимальный режим 3D печати турбинной мешалки, обеспечивающий высокую прочность изделия и производительность технологии.*

Ключевые слова: *полимерный композит, раствор, турбинная мешалка, 3D печать, технология.*

OPTIMIZATION OF 3-D MODE PRINTING OF TURBINE STIRRER FOR DISPERSING SOLUTIONS POLYMER COMPOSITES

Roman Li [1]***, Maria Kiba*** [2]***, Dmitry Grebenkov*** [3]***, Viktor Erokhin*** [4]
[1,3,4] *Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia*
[1] romanlee@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-4880-6081
[3]https://orcid.org/0000-0003-3045-7434, [4]https://orcid.org/ 0000-0003-3997-2563
[2] *St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia*

[2] https://orcid.org/0000-0001-9999-8146

Abstract. *The design of the turbine stirrer is characterized by a rather complex shape of working surfaces and during its manufacture by traditional methods unique molds are required for each type of stirrer, increased material and labor costs are required. The use of 3D printing allows you to obtain products with a complex surface configuration, with minimal costs and which do not require subsequent machining. Analysis was carried out and selection of 3D printing type and material of turbine stirrer intended for mixing of elastomeric nanocomposite solutions components was carried out. FDM (Fused Deposition Modeling) is the most suitable type of 3D printing for solving design and technological problems in the manufacture of turbine stirrers. Plastics of the brands ABS, PLA and PETG have become very widespread in this type of 3D printing. The highest mechanical properties, chemical resistance and the lowest price of the materials under consideration are PETG plastic, which was chosen for the manufacture of a turbine stirrer designed to mix and disperse solutions of elastomeric nanocomposites. An active experiment was implemented according to the* B_2 *plan. The samples are PETG plastic plates printed on a Flying Bear Ghost 5 3D printer. The main mode parameters of 3D printing by FDM type, which determine the strength of samples and printing performance, are: the number of concentric lines that make up the wall of the printed product and the line width. A regression model of the dependence of strength of samples made of PETG plastic on the number and width of lines in 3D printing was obtained. The optimal 3D printing mode of the turbine stirrer is set, providing high strength of the product and performance of the technology.*

Keywords: *polymer composite, solution, turbine stirrer, 3D printing, technology*.

Для цитирования: Ли Р.И., Киба М.Р., Гребеньков Д.В., Ерохин В.Е. Оптимизация режима 3-D печати тербинной мешалки для диспергирования растворов полимерных композитов // Наука в центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 67, № 1. С. 7-15. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-7-15.

For citation: Li R., Kiba M., Grebenkov D., Erokhin V. Optimization of 3-D mode printing of turbine stirrer for dispersing solutions polymer composites. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 67(1): 7-15. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-7-15.

Введение. Применение современных технологий восстановления изношенных деталей позволяет существенно повысить их ресурс значительно уменьшить затраты на ремонт сельскохозяйственной техники [1-14]. Высокий технико-экономический эффект проявляется при восстановлении изношенных посадочных отверстий корпусных деталей растворами полимерных композитов. Это увеличение ресурса подшипниковых узлов и корпусных деталей после восстановления и большая экономия денежных средств, обусловленная низкой себестоимостью технологии восстановления. Эффективное восстановление посадок подшипников обеспечивается в случае, когда полимерный материал обладает высокими механическими и теплофизическими свойствами, достигаемыми при равномерном распределении частиц наполнителя по объему полимерной матрицы. При не однородном распределении частиц, наличии их агрегатов в растворе полимера резко ухудшаются эксплуатационные свойства композита. Чтобы избежать вышеупомянутых негативных явлений растворы полимерных композитов следует подвергать ультразвуковой или механической обработке. Смешение и диспергирование растворов полимерных композитов в аппаратах с турбинными мешалками отличается простотой технологии, обеспечивает существенное повышение механических и теплофизических свойств материалов, предназначенных для восстановления изношенных корпусных деталей [15-16].

В ЛГТУ разработана конструкция и определены оптимальные конструктивные параметры турбинной мешалки для смешения и диспергирования растворов полимерных композитов [17]. Конструкция турбинной мешалки обладает достаточно сложной формой рабочих поверхностей и для ее производства традиционными способами необходимо изготовление уникальных пресс-форм для каждого типоразмера мешалки, повышенные материальные и трудовые затраты. Использование 3D печати позволяет получать изделия со сложной конфигурацией поверхности, с минимальными затратами и которые не требуют в последствии механической обработки [18].

Цель исследований – провести анализ и осуществить выбор типа 3D печати и материала турбинной мешалки, экспериментально исследовать влияние режимов 3D печати на механические свойства образцов, определить рациональный режим 3D печати турбинной мешалки.

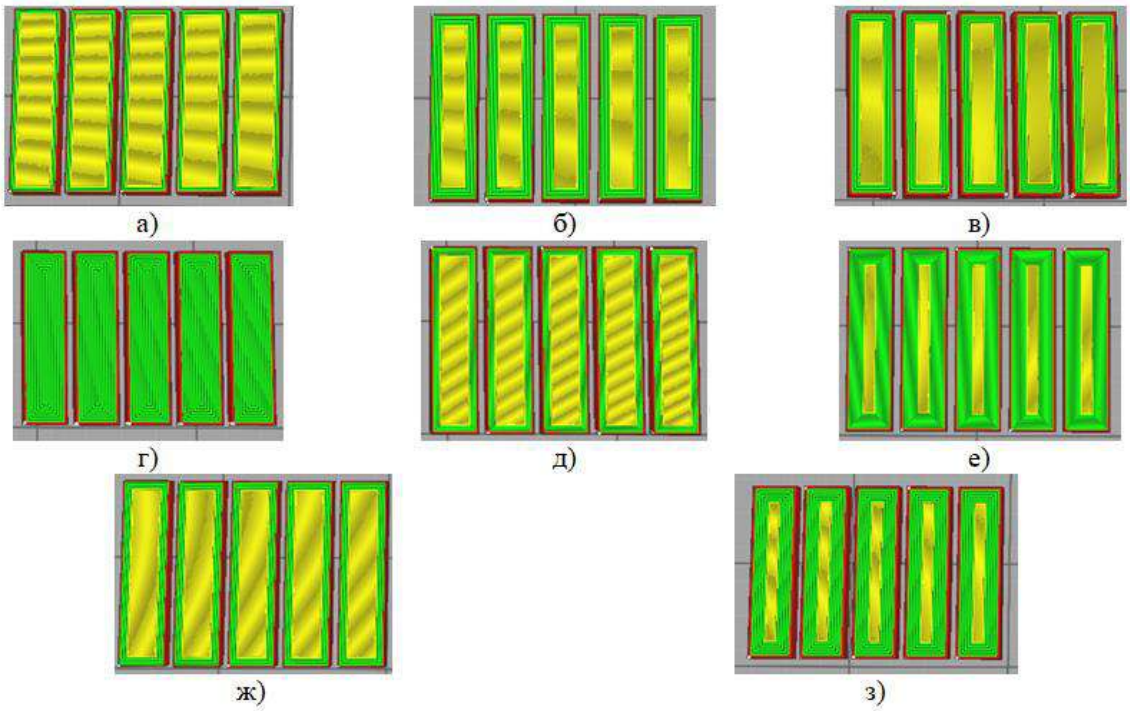
Материалы и методы. В качестве оценочного критерия использовали прочность образцов, изготовленных методом 3D печати при различных технологических режимах. Образцы изготовлены в виде пластин на 3D принтере марки Flying Bear Ghost 5 из материала PETG (рисунок 1). Размеры образца: $50 \times 12{,}8 \times 5{,}0$ мм. Повторность – 5.

Методика испытания образцов: «Испытания образцов проводили на разрывной машине ИР 5082-50. При этом вели запись диаграммы "нагрузка-деформация". Скорость нагружения при испытаниях составляла 5 мм/мин и была постоянной.

Прочность образцов σ рассчитывали по формуле

$$\sigma = \frac{F_P}{A},$$

где F_P – разрушающая нагрузка, Н; A – площадь поперечного сечения образца, мм^2» [7].



а) опыт №1; б) опыт №2; в) опыт №3; г) опыт №4; д) опыт №5; е) опыт №6;
ж) опыт №7; з) опыт №8

Рисунок 1 – Образцы, изготовленные на 3D принтере марки Flying Bear Ghost 5 при различных режимах (таблица 5)

Для определения оптимального режима 3D печати турбинной мешалки спланировали активный эксперимент по плану B_2. Факторы и интервалы варьирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование фактора	Кодированное обозначение фактора	Уровни варьирования фактора			Интервал варьирования
		нижний	нулевой	верхний	
Количество концентрических линий, составляющих стенку изделия	X_1	4	6	8	2
Ширина линии, мм	X_2	0,4	0,6	0,8	0,2

Результаты и обсуждение. Различают два основных типа 3D печати: Fused Deposition Modeling (FDM), использующий пластиковый филамент для нанесения слоев, и Stereolithography (SLA), где ультрафиолетовые светодиоды отверждают жидкую смолу [18].

Для конструкторских задач, требующих прочности, жесткости и экономичности, наиболее подходящим типом 3D печати является FDM. Способ печати основан на нагревании и выталкивании пластичного материала через сопло для создания трехмерного объекта слой за слоем.

Популярные расходные материалы для 3D печати включают в себя пластики марок: ABS, PLA и PETG. Каждый материал обладает своими уникальными свойствами. В таблице 2 представлены характеристики пластиков.

Таблица 2 – Характеристики пластиков для 3D печати

Характеристика пластика	Марка пластика		
	PETG	ABS	PLA
Температура печати, °С	200 – 235	220 – 250	180 – 220
Температура платформы, °С	65 – 80	80 – 110	40 – 60
Токсичность	Низкая	Высокая	Низкая
Предельная температура эксплуатации, °С	80	110	50
Усадка, %	0,2 – 0,6	0,4 – 2,0	0,3 – 0,5
Стойкость к УФ излучению	Высокая	Средняя	Низкая
Химическая стойкость,	Высокая	Средняя	Низкая
Растворитель	дихлорэтан	дихлорэтан, ацетон этилацетат	дихлорэтан, ацетон этилацетат
Влагопоглощение, %	0,8 – 1,2%	0,2 – 0,4	0,2 – 0,4
Плотность, г/см³	1,26 – 1,28	1,02 – 1,06	1,23 – 1,25
Деформация, %	50 – 150	10 – 50	5 – 10
Цена, руб/грамм	0,66	0,8	0,9

Материал турбинной мешалки должен отвечать определенным требованиям в соответствии с особенностями смешиваемых и диспергируемых компонентов (таблицы 3 и 4).

Таблица 3 – Состав и характеристики лака Ф-40 [19]

№ п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Значение
1	Смола ФКУ (феноло-формальдегидная смола на основе замещенного фенола винилацетиленовой структуры)	масс.%	8
2	Каучук синтетический бутадиен-нитрильный марки СКН-40С	масс.%	12
3	Ацетон технический (ГОСТ 2768-84)	масс.%	80
4	Массовая доля сухого остатка	%	20
5	Прочность связи со сталью при сдвиге	МПа	5,0

Таблица 4 – Параметры нанопорошка алюминия [20]

№ п/п	Наименование параметра	Размерность	Значения
1	Среднеарифметический размер частиц	нм	50…70
2	Насыпная плотность	г/см^3	0,07
3	Точка плавления	^{o}C	640
4	Содержание активного алюминия	%	90
5	Удельная поверхность	м^2/г	24,5

В виду того, что процесс смешения компонентов осуществляется в помещении при комнатной температуре предельная температура эксплуатации для мешалки не играет принципиального значения. Все рассматриваемые пластики этому критерию отбора соответствуют (таблица 2).

В качестве наполнителя в эластомерном композите используют наночастицы алюминия (таблица 4). Особенностью частиц является малый размер, высокая удельная поверхность и склонность к агрегированию. Поэтому для разрушения агрегатов наночастиц смешение и диспергирование компонентов выполняют при высокой частоте вращения мешалки n = 1300 мин$^{-1}$ [17]. Для обеспечения высокой долговечности мешалки ее материал должен иметь высокие механические свойства.

Лак Ф-40 (ТУ 6-06-246-92) поставляется ОАО «НИИ пластических масс им. Г. С. Петрова» в виде раствора (таблица 3). Особенностью данного раствора эластомера является ацетон, содержание которого достигает 80%. Поэтому материал турбинной мешалки должен обладать высокой химической стойкостью и не растворяться в ацетоне.

Наиболее высокие механические свойства, химическую стойкость и наименьшую цену из рассматриваемых материалов имеет пластик PETG. Поэтому этот пластик выбрали в качестве материала для изготовления турбинной мешалки, предназначенной для смешения и диспергирования растворов эластомерных нанокомпозитов.

Анализ литературных источников показал, что основными режимными параметрами 3D печати по типу FDM, определяющими прочность образцов и производительность печати являются: количество концентрических линий, составляющих стенку печатаемого изделия X_1 и ширина линии X_2.

Реализован активный эксперимент по плану B_2. В таблице 5 показаны матрица плана и результаты эксперимента.

Таблица 5 – План B_2 и результаты активного эксперимента

№ п/п	Факторы		Опытное значение отклика			Среднее значение отклика $\bar{Y}_g$, МПа	Расчетное значение отклика $\hat{Y}_g$, МПа	Дисперсия, S_g^2
	X_1	X_2	Y_1	Y_2	Y_3			
1	-1	-1	31,45	31,93	31,49	31,6242	31,5359	0,0078
2	+1	-1	35,95	35,83	35,87	35,8803	35,8651	0,0002
3	-1	+1	33,74	33,93	33,96	33,8792	33,8944	0,0002
4	+1	+1	37,82	37,37	37,43	37,5403	37,6285	0,0078
5	-1	0	36,83	36,31	36,08	36,4061	36,4791	0,0053
6	+1	0	40,71	40,29	40,75	40,5837	40,5107	0,0053
7	0	-1	36,40	36,57	36,94	36,6345	36,7380	0,0107
8	0	+1	38,79	38,99	38,93	38,9024	38,7989	0,0107

Проведен регрессионный анализ результатов эксперимента, итоги которого показаны в таблице 6. Методика регрессионного анализа: «однородность дисперсий оценивали по критерию Кохрена, значимость коэффициентов регрессии сравнением с соответствующими доверительными

интервалами, работоспособность по коэффициенту детерминации R^2, адекватность регрессионной модели по критерию Фишера, координаты экстремума взятием частных производных по каждому фактору в регрессионной модели и приравниванием выражений к нулю, в заключении провели каноническое преобразование регрессионной модели и по ней построили двумерное сечение поверхности отклика» [21].

Таблица 6 – Результаты регрессионного анализа

Критерий Кохрена		Критерий Фишера		Коэффициент детерминации R^2
Табличное значение, G_m	Расчетное значение, G_p	Табличное значение, F_m	Расчетное значение, F_p	
0,51	0,3321	3,01	1,29	0,9978
Дисперсии однородны		Регрессионная модель адекватна		Регрессионная модель работоспособна

В итоге получили зависимость прочности Y образцов, изготовленных из пластика PETG, от количества концентрических линий, составляющих стенку печатаемого изделия X_1 и ширины линии X_2.

Регрессионная модель в натуральных единицах

$$Y = -30{,}158 + 10{,}343 \cdot x_1 + 120{,}3 \cdot x_2 - 0{,}372 \cdot x_1 x_2 - 0{,}7593 \cdot x_1^2 - 94{,}09 \cdot x_2^2$$

На рисунке 2 показана поверхность, а на рисунке 3 – двумерное сечение поверхности отклика.

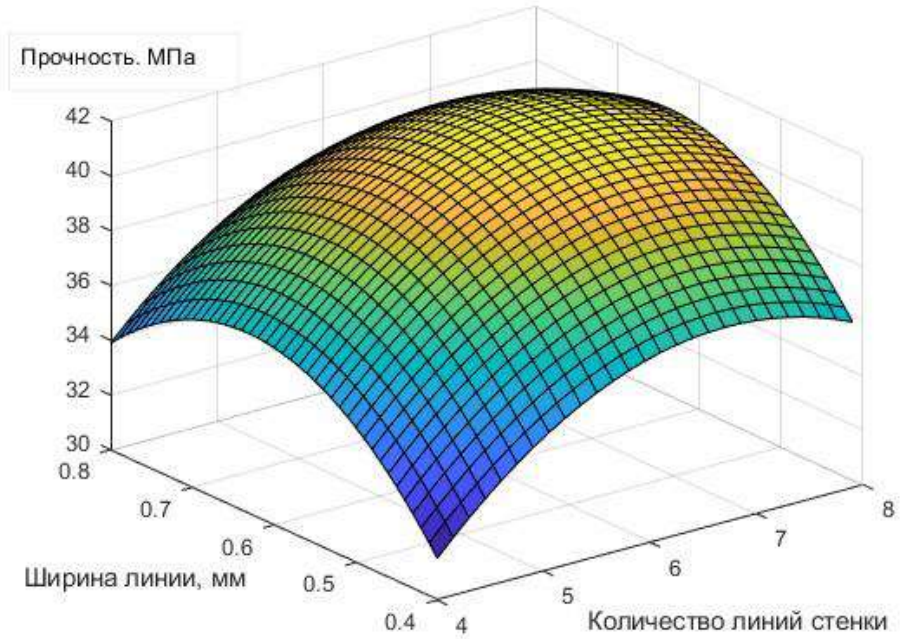


Рисунок 2 – Поверхность отклика

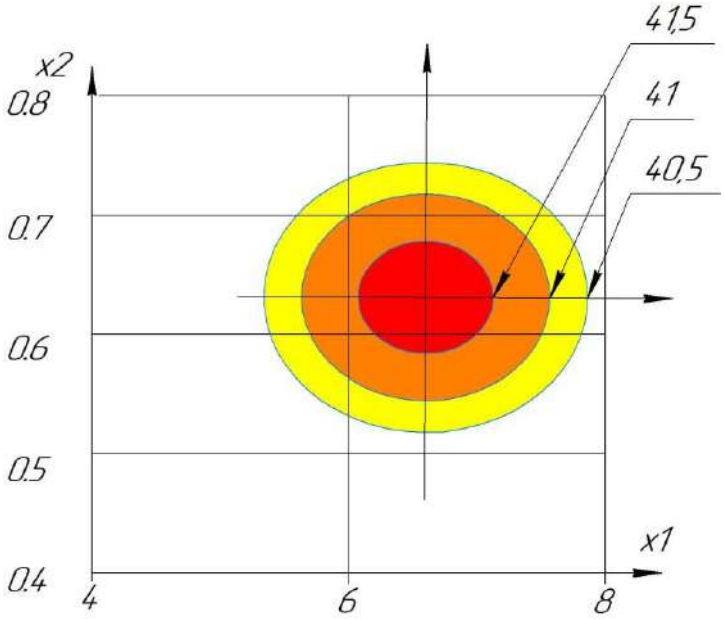


Рисунок 3 – Двумерное сечение поверхности отклика

Выводы:

1. Определен тип 3D печати и материал для изготовления турбинной мешалки, предназначенной для смешения и диспергирования растворов эластомерных нанокомпозитов,

2. Получена регрессионная модель зависимости прочности образцов, изготовленных из пластика PETG, от количества концентрических линий, составляющих стенку печатаемого изделия X_1 и ширины линии X_2.

Установлен оптимальный режим 3D печати турбинной мешалки, обеспечивающий высокую прочность изделия и производительность технологии.

Список источников

1. Кононенко А. С. Повышение надежности неподвижных фланцевых соединений сельскохозяйственной техники использованием наноструктурированных герметиков: Дисс. ... д-ра техн. наук. М., 2012. 405 с.

2. Жачкин С. Ю., Краснова М. Н., Пеньков Н. А., Краснов А. И. Моделирование механического воздействия инструмента при получении гальванических композитных покрытий // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 120. С. 130–134.

3. Жачкин С.Ю., Пеньков Н.А., Мандрыкин И.А., Беленцов В.Г. Интенсификация восстановления деталей сельхозмашин дисперсно-упрочненным композитным покрытием на основе хрома // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. №3 (32) . С. 49-54.

4. Кононенко А.С., Дмитраков К.Г. Повышение стойкости полимерных композитов холодного отверждения к воздействию рабочих жидкостей использованием наноматериалов // Международный технико-экономический журнал. 2015. № 1. С. 89–94.

5. Черноиванов, В. И. Голубев, И. Г. Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы). – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 376 с.

6. Карагодин, В. И., Митрохин Н. Н. Ремонт автомобилей и двигателей. М.: Мастерство, 2001. – 496 с.

7. R. I. Li, D. N. Psarev, M. R. Kiba. Promising Nanocomposite Based on Elastomer F-40 for Repairing Base Members of Machines. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2019, Vol. 12, No. 2, pp. 128-132.

8. Полимерные нанокомпозиты : многообразие структурных форм и приложений / А.К. Микитаев, Г.В. Козлов, Г.Е. Заиков; Ин-т биохим. физики им. Н.М. Эмануэля РАН. – М. : Наука,

2009. – 278 с.

9. Ли, Р.И. Математическая модель инфракрасного нагрева корпусных деталей при восстановлении полимерным материалом / Р.И. Ли, Д.Н. Псарев, А.Н. Быконя // Клеи. Герметики, Технологии. 2019. № 9. С. 38-43.

10. R. I. Li, D. N. Psarev, V. A. Malyugin. A Polymeric Nanocomposite for Fixing Bearings during Assembly and Repair of Equipment. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 261-265.

11. Модель формирования равномерного полимерного покрытия на наружной поверхности вращающейся цилиндрической детали. Ли Р.И., Псарев Д.Н. Клеи. Герметики. Технологии. 2015. № 2. С. 34-38.

12. Михайлюк, А. Е. Разработка эластомерных материалов на основе этиленпропиленовых каучуков, модифицированных высокодисперсными частицами металлов: дис. ... канд. техн. наук / Михайлюк А.Е. – Волгоград, 2014. – 140 с.

13. Помогайло, А. Д. Наночастицы металлов в полимерах / А. Д. Помогайло, А. С. Розенберг, И. Е. Уфлянд. – Москва : Химия, 2000. – 672 с.

14. Кособудский, И. Д. Наноразмерные металлические частицы в полимерных матрицах: I. Синтез, механизмы образования и стабилизации / И. Д. Кособудский // Известия высших учебных заведений. – 2000. – Т. 43 (4). – С. 3-18.

15. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. Польша. 1971. Пер. с польск. под ред. Щупляка. И.А. Л., Химия, 1975. 384 с.

16. Проектирование процессов и аппаратов пищевых производств. Под ред. В.Н. Стабникова. Киев: Вища школа, 1982. - 199 с.

17. Ли, Р.И. Оптимизация конструктивных и режимных параметров турбинной мешалки для диспергирования растворов полимерных композитов / Р. И. Ли, М. Р. Киба, Д. В. Гребеньков, В. Е. Ерохин // Наука в центральной России. – 2023. – №6(66). – С. 34-43.

18. Гончарова Ю.А. Реновация технических средств с использованием 3D-печати полимерных запасных частей: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03: / Гончарова Ю.А. – Москва, 2017. – 188 с.

19. https://institut-plastmass.tiu.ru/p32507115-fenolnye-smoly-laki.html.

20. www.nanosized-powders.com.

21. Ли, Р. И. Основы научных исследований: Учеб. пособие / Р. И. Ли. – Липецк: ЛГГУ, 2013. – 190 с.

References

1. Kononenko A. S. Increasing the reliability of fixed flange connections of agricultural machinery using nanostructured sealants: Diss. ... Dr. Tech. Sci. M., 2012. 405 p.

2. Zhachkin S. Yu., Krasnova M. N., Penkov N. A., Krasnov A. I. Modeling of the mechanical impact of a tool when producing galvanic composite coatings // Proceedings of GOSNITI. 2015. T. 120. pp. 130–134.

3. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Mandrykin I.A., Belentsov V.G. Intensification of restoration of agricultural machine parts with dispersion-strengthened composite coating based on chromium // Innovations in agriculture. 2019. No. 3 (32). pp. 49-54.

4. Kononenko A.S., Dmitrakov K.G. Increasing the resistance of cold-curing polymer composites to the effects of working fluids using nanomaterials // International Technical and Economic Journal. 2015. No. 1. pp. 89–94.

5. Chernoivanov, V. I. Golubev, I. G. Restoration of machine parts (State and prospects). – M.: FGNU “Rosinformagrotekh”, 2010. – 376 p.

6. Karagodin, V.I., Mitrokhin N.N. Repair of cars and engines. M.: Masterstvo, 2001. – 496 p.

7. R. I. Li, D. N. Psarev, M. R. Kiba. Promising Nanocomposite Based on Elastomer F-40 for Repairing Base Members of Machines. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2019, Vol. 12, No. 2, pp. 128-132.

8. Polymer nanocomposites: variety of structural forms and applications / A.K. Mikitaev, G.V. Kozlov, G.E. Zaikov; Institute of Biochemistry. physics named after N.M. Emanuel RAS. – M.: Nauka, 2009. – 278

p.

9. Lee, R.I. Mathematical model of infrared heating of body parts during restoration with polymer material / R.I. Lee, D.N. Psarev, A.N. Bykonya // Adhesives. Sealants, Technologies. 2019. No. 9. pp. 38-43.

10. R. I. Li, D. N. Psarev, V. A. Malyugin. A Polymeric Nanocomposite for Fixing Bearings during Assembly and Repair of Equipment. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 261-265.

11. Model of the formation of a uniform polymer coating on the outer surface of a rotating cylindrical part. Lee R.I., Psarev D.N. Adhesives. Sealants. Technologies. 2015. No. 2. P. 34-38.

12. Mikhailyuk, A. E. Development of elastomeric materials based on ethylene-propylene rubbers modified with highly dispersed metal particles: dis. ...cand. tech. Sciences / Mikhailyuk A.E. – Volgograd, 2014. – 140 p.

13. Pomogailo, A. D. Nanoparticles of metals in polymers / A. D. Pomogailo, A. S. Rozenberg, I. E. Uflyand. – Moscow: Chemistry, 2000. – 672 p.

14. Kosobudsky, I. D. Nanosized metal particles in polymer matrices: I. Synthesis, mechanisms of formation and stabilization / I. D. Kosobudsky // News of higher educational institutions. – 2000. – T. 43 (4). – P. 3-18.

15. Strenk F. Stirring and apparatus with stirrers. Poland. 1971. Transl. from Polish edited by Shpiplika. I.A. L., Chemistry, 1975. 384 p.

16. Design of processes and apparatus for food production. Ed. V.N. Stabnikova. Kyiv: Vishcha School, 1982. - 199 p.

17. Lee, R.I. Optimization of design and operating parameters of a turbine mixer for dispersing solutions of polymer composites / R. I. Li, M. R. Kiba, D. V. Grebenkov, V. E. Erokhin // Science in Central Russia. – 2023. – No. 6(66). – P. 34-43.

18. Goncharova Yu.A. Renovation of technical equipment using 3D printing of polymer spare parts: dis. ...cand. tech. Sciences: 05.20.03: / Goncharova Yu.A. – Moscow, 2017. – 188 p.

19. https://institut-plastmass.tiu.ru/p32507115-fenolnye-smoly-laki.html

20. www.nanosize-powders.com

21. Lee, R.I. Fundamentals of scientific research: Textbook. allowance / R.I. Lee. – Lipetsk: Leningrad State University for Humanities, 2013. – 190 p.

Информация об авторах

Р. И. Ли – доктор технических наук, профессор; М. Р. Киба – кандидат технических наук;
Д. В. Гребеньков – кандидат технических наук, доцент; В. Е. Ерохин – аспирант.

Information about the authors

R. Li – Doctor of Technical Science, Professor; M. Kiba – Candidate of Technical Science;
D. Grebenkov – Candidate of Technical Science, Associate Professor; V. Erokhin – Post Graduate Student.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 23.12.2023 Принята к публикации (Accepted): 20.02.2024