УДК 621.78
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-2-125-134

УПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛИЗАЦИЕЙ ПОЛИМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ АПК, ПОЛУЧЕННЫХ ПОСРЕДСТВОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИХ

[1]Воронин Николай Владимирович
[1]Скоморохова Анастасия Игоревна
[2]Филатов Иван Сергеевич
[1,3]Родионов Юрий Викторович
[1,3]Никитин Дмитрий Вячеславович

[1]ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов
[2]ТОГБПОУ «Приборостроительный колледж», г. Тамбов
[3]ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», г. Мичуринск

Реферат. *Активное внедрение аддитивные технологий во многих отраслях промышленности, в том числе в сельском хозяйстве, обуславливает актуальность изучения свойств материалов, которые используются в печати, и характеристики получаемых изделий. В трехмерной печати широко используются полимерные материалы, на основе которых можно создавать новые композиты с требуемыми параметрами. Одним из подходов значительного улучшения свойств деталей из полимеров, полученных с использованием 3D-печати, является их металлизация. В статье предложена технология поверхностного упрочнения деталей из термопластических полимерных материалов. Данная технология основана на совмещении действия внешнего теплового потока, который направлен на упрочняемую поверхность, и магнитного поля, действующего с противоположной поверхности детали. Под воздействием магнитного и термического полей происходит диффузия частиц металлического порошка внутрь поверхности полимера. В частности, рассматривается упрочнение лопатки рабочего колеса жидкостнокольцевого вакуумного насоса, изготовленного из АБС-пластика посредством трехмерной печати по технологии FDM. Рассмотрены характеристики используемого термопластического полимера, которые влияют на режимные параметры процесса печати и последующего упрочнения. Описана разработанная установка, посредством которой осуществляется магнитотермическое армирование. Предложены следующие параметры поверхностного упрочнения: давление формования 2 МПа; предварительный нагрев пресс-формы до 160-180 °С (приблизительно на 20 °С ниже температуры плавления АБС-пластика); выдержка при указанных температуре и давлении не более 2 минут с последующим охлаждением на воздухе. В качестве ферромагнетика для упрочнения выбран порошок никеля с размером частиц 40 мкм. В дальнейшем возможно проведение исследований по внедрению металлического порошка в изделие в процессе печати.*

Ключевые слова: *полимерные материалы, аддитивные технологии, поверхностное упрочнение, магнитотермия, жидкостнокольцевой вакуумный насос*

METALIZATION HARDENING OF POLYMER PARTS OF MACHINES AND MECHANISMS OF APC PRODUCED BY ADDITIVE TECHNOLOGIES

[1]Voronin Nikolay
[1]Skomorokhova Anastasia
[2]Filatov Ivan
[1,2]Rodionov Yuri
[1,2]Nikitin Dmitry

[1]*FSBEI HE "Tambov State Technical University"*
[2]*FSBEI HE "Michurinsk State Agrarian University"*

Abstract. *The active introduction of additive technologies in many industries, including agriculture, determines the relevance of studying the properties of materials used in printing and the characteristics of the resulting products. Polymeric materials are widely used in 3D printing, which can be used to create new composites with the required parameters. One of the approaches to significantly improve the properties of parts made of polymers obtained using 3D printing is their metallization. The article proposes a technology for surface hardening of parts made of thermoplastic polymer materials. This technology is based on combining the action of an external heat flux, which is directed to the hardened surface, and a magnetic field, acting from the opposite surface of the part. Under the influence of magnetic and thermal fields, diffusion of metal powder particles into the polymer surface occurs. In particular, the hardening of the impeller blade of a liquid ring vacuum pump made of ABS plastic by means of three-dimensional printing using FDM technology is considered. The characteristics of the used thermoplastic polymer, which affect the regime parameters of the printing process and subsequent hardening, are considered. The developed installation is described, by means of which magnetothermal reinforcement is carried out. The following surface hardening parameters are possible: molding pressure 2 MPa; preheating the mold to 160-180°C (approximately 20°C lower than the melting point of ABS plastic); exposure at the specified temperature and pressure for no more than 2 minutes, followed by cooling in air. Nickel powder with a particle size of 40 μm was chosen as a ferromagnet for hardening. In the future, it is possible to conduct research on the introduction of metal powder into the product during the printing process.*

Keywords: *polymeric materials, additive technologies, surface hardening, magnetic thermia, liquid ring vacuum pump.*

Введение. Повышение функциональности изделий и улучшение их эксплуатационных характеристик представляют собой важные задачи для всех отраслей промышленности, что делает актуальным внедрение новых материалов. К наиболее перспективным можно отнести композиционные материалы на основе полимеров, которые уже получили широкое распространение при изготовлении деталей для нужд химической промышленности и сельского хозяйства [1-3]. Основными достоинствами полимерных материалов являются: высокая удельная прочность, устойчивость к химическим воздействиям, хорошие диэлектрические свойства. Изделия из полимеров, по сравнению с металлическими аналогами, обладают меньшей массой, а их изготовление требует меньших затрат. Однако полимеры имеют ряд недостатков. Среди наиболее значимых можно выделить низкую контактную прочность, склонность к повреждениям вследствие воздействия ультрафиолетового излучения и влаги [4-6].

В настоящее время интерес к изучению свойств полимеров вызван активным внедрением в производство технологий трехмерной печати, которая позволяет получать различные модели для задач прототипирования [7]. Наиболее распространенным способом 3D-печати является моделирование послойным наплавлением – Fused Deposition Modelig (FDM), при котором термопластичный полимер, обычно в виде непрерывной нити, нагревается, а затем подается на рабочий стол для послойного формирования детали [8]. Зачастую при печати по технологии FDM используется АБС-пластик, свойства которого, как и прочих полимеров, сильно ухудшаются от контакта с влагой и попадания под ультрафиолетовое излучение. Под их воздействием пластик теряет прочность, пластичность, в материале возникают микротрещины, приводящие к утрате эксплуатационных показателей изделий и отказу механизмов.

Добиться значительного улучшения свойств деталей из полимеров, полученных посредством трехмерной печати, можно путем их металлизации [9]. Нанесение металлических покрытий способствует снижению газопроницаемости, повышению тепло- и электропроводности, поглощению или отражению ионизирующих излучений, повышает износостойкость и поверхностную твердость полимеров.

Перспективным способом поверхностного упрочнения является внедрение ультрадисперсных металлических частиц непосредственно в рабочие поверхности изделий на основе полимеров, которые подвергаются наиболее сильному износу.

Целью статьи является исследование поверхностного упрочнения деталей из термопластических полимерных материалов, изготовленных с применением аддитивных технологий, посредством магнитотермического армирования.

Материалы и методы. Описание свойств полимеров и их подробное изучение приводится в работах [10-13]. Исследованиям значимых эксплуатационных характеристик и поиском подходов к повышению функциональности деталей сельскохозяйственной техники посвящены статьи [14-18].

При металлизации магнитотермическим армированием поверхностных слоев полимера надежная фиксация ультрадисперсных металлических частиц достигается за счет обхватывания их остывшим термопластом [19].

Рабочее колесо жидкостнокольцевого вакуумного насоса (ЖВН), напечатанное с помощью 3D-принтера, представлено на рисунке 1.

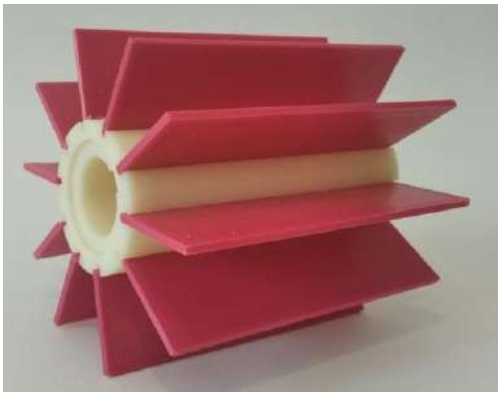


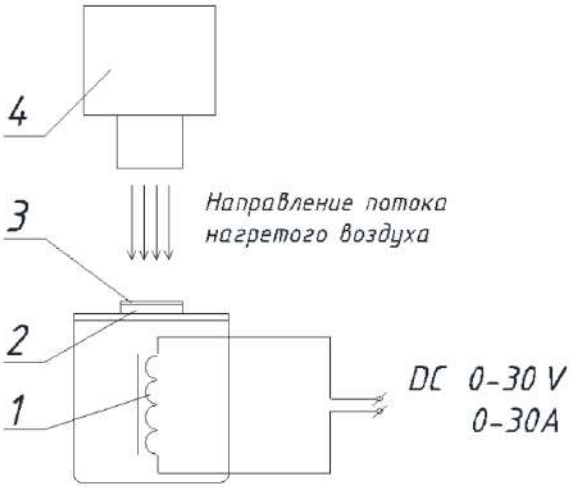
Рисунок 1 – Рабочее колесо ЖВН, изготовленное посредством аддитивных технологий

Печать производилась по технологии FDM. В качестве материала печати использовался АБС-пластик, температура плавления которого составляла 200 °С, плотность 1,04 г/см^3, температура размягчения 90 °С. Он имеет достаточно широкий диапазон эксплуатационных температур (примерно, -40…+80 °С) и легко поддается дополнительной механической обработке [20]. Параметры печати были следующими: высота слоя 0,2 мм; температура сопла 265 °С, температура рабочего стола 105 °С, скорость печати 60 мм/с, процент заполнения 20%.

На рисунке 2 представлена схема установки, предназначенной для внедрения частиц ферромагнетика в поверхности деталей из термопластичных полимерных материалов [21].

Разработанная установка работает следующим образом. Упрочняемая деталь 2 помещается на рабочую поверхность магнитной системы 1, после чего на поверхность наносится слой ультрадисперсного ферромагнитного порошка 3. Далее запускается устройство 4, которое нагнетает нагретый воздух в рабочее пространство установки. Под суммарным воздействием магнитного и теплового полей частицы порошка внедряются в поверхностные слои изделия. В результате получается металлокомпозитный слой, имеющий определенную глубину в зависимости от требуемых свойств, предъявляемых к детали.

На рисунке 3 представлено фото опытной установки для поверхностного упрочнения образцов небольших размеров.



1 – магнитная система (катушка со стальным сердечником); 2 – изделие из термопластичного полимера; 3 – слой ультрадисперсных металлических частиц; 4 – генератор тепла

Рисунок 2 – Схема установки для поверхностного упрочнения изделий из термопластичных полимеров

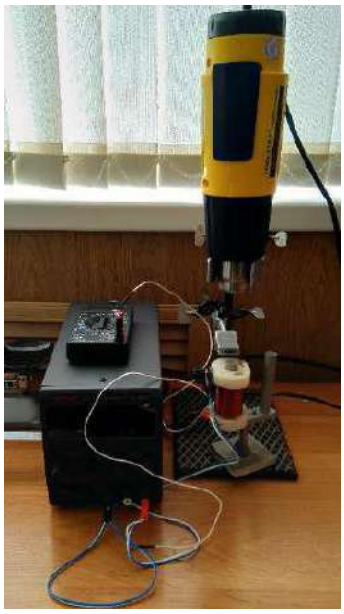


Рисунок 3 – Фото опытной установки для поверхностного упрочнения изделий из термопластичных полимеров

На вертикально расположенной штанге установлены держатели генератора теплового потока, держатель упрочняемых образцов и катушки-электромагнита. Также здесь располагаются регулируемый источник постоянного тока, необходимый для питания катушки. При этом генератор теплового потока и упрочняемый образец полимера имеют возможность перемещения относительно друг друга и электромагнита. В генераторе теплового потока предусмотрена трехступенчатая настройка расхода воздуха и электронная настройка температуры. Для замера величины температуры в месте контакта металлических частиц и полимера используется электронный термометр с термопарой типа ХК.

Результаты и их обсуждение.

Поверхностное упрочнение лопаток рабочего колеса ЖВН, изготовленного посредством аддитивных технологий, предлагается производить следующим образом: на внутреннюю

поверхность одной из частей предварительно нагретой пресс-формы (играющей роль магнитного аккумулятора) наносится и распределяется вручную ультрадисперсный ферромагнитный порошок. Затем в эту же часть пресс-формы помещается напечатанная лопатка рабочего колеса, пресс-форма закрывается и помещается под пресс, при этом необходимо учесть возможность усадки полимера в процессе формования и последующего охлаждения. Давление выбирается индивидуально для каждого используемого пластика. Например, для АБС-пластика давление формования должно составлять не менее 1 МПа.

Пресс-форма с деталью некоторое время выдерживается при заданной температуре, затем охлаждается на воздухе. После чего пресс-форма размыкается, лопатка извлекается, и с нее удаляются излишки полимера. Оставшийся ферромагнитный порошок после отключения магнитной системы можно использовать повторно, так как при температуре ниже 200°С не происходит сколько-нибудь интенсивного окисления используемого металла (никеля или кобальта) или потери его магнитных свойств.

Возможен режим упрочнения лопатки со следующими параметрами:

- материал: АБС-пластик;
- используемый ферромагнетик: порошок никеля с размером частицы 40 мкм;
- давление формования: 2 МПа;
- температура предварительного нагрева пресс-формы: 160-180 °С (т.е. приблизительно на 20 °С ниже температуры плавления АБС-пластика, что исключает его переход в жидкую фазу);
- время выдержки при заданных температуре и давлении: не более 2 минут;
- охлаждение пресс-формы с деталью: на воздухе.

После упрочнения поверхность лопатки может быть дополнительно доработана микрошлифованием (более грубые способы доработки не подходят из-за небольшой толщины слоя металла) или другими, более тонкими методами. В итоге поверхность в целом приобретает твердость и износостойкость, аналогичную примененному исходному ферромагнетику. Однако стоит отметить, что традиционные инденторные способы измерения твердости такой поверхности неприменимы по причине высокой вероятности попадания индентора между частицами, из-за чего полученные значения твердости могут колебаться в очень широком диапазоне.

Также в рамках данной работы была проверена возможность упрочнения лопаток ЖВН, изготовленных с помощью технологий 3D-печати из АБС-пластика, по изначальной технологии, описанной в работах [1-3, 19, 21, 22]. Температура в зоне упрочнения составила 230-240°С, напряжение и сила тока магнитной системы – 14 В и 5,2 А. соответственно, время воздействия – 30 сек. Результат представлен на рисунке 4. В первом эксперименте (рисунок 4, а) процент внедренных в поверхность лопаток ферромагнитных частиц минимален, что свидетельствует о недостаточно оптимальных условиях упрочнения. Это может быть связано с тем, что в первом эксперименте выбранные параметры воздействия на поверхность лопатки были ниже (210°С, 12 В и 4 А, соответственно), чем указанные выше, за исключением времени воздействия. В последующих экспериментах (рисунок 4, б-г) процент внедренных ферромагнитных частиц увеличен, о чем свидетельствуют образования крупных конгломератов, как вблизи дефектных областей, так и вне их. Проверка износоустойчивости полученных поверхностей достаточным усилием трения показала надежное закрепление частиц в поверхности лопаток и поверхностную твердость, сопоставимую с твердостью внедренного металла.

Представленная технология способствует улучшению эксплуатационных показателей полимерных изделий, полученных с использованием трехмерной печати. Проводятся исследования по расширению области применения такого подхода к поверхностному упрочнению, а также осуществляется отработка процесса диффузии более мелких частиц ферромагнетика и металлизации поверхностей образцов из различных термопластичных и термореактивных полимеров.

Стоит отметить, что поверхность, подвергаемая упрочнению, должна быть заранее подготовлена [22], для чего требуется внедрение дополнительной операций обработки в процесс производства изделий. Особенно это осложняется в случаях, когда деталь имеет сложную форму с труднодоступными криволинейными поверхностями. Поэтому исследования по внедрению металлического порошка в модель непосредственно в процессе ее формирования при аддитивном производстве являются актуальными в фундаментальном и прикладном аспектах.

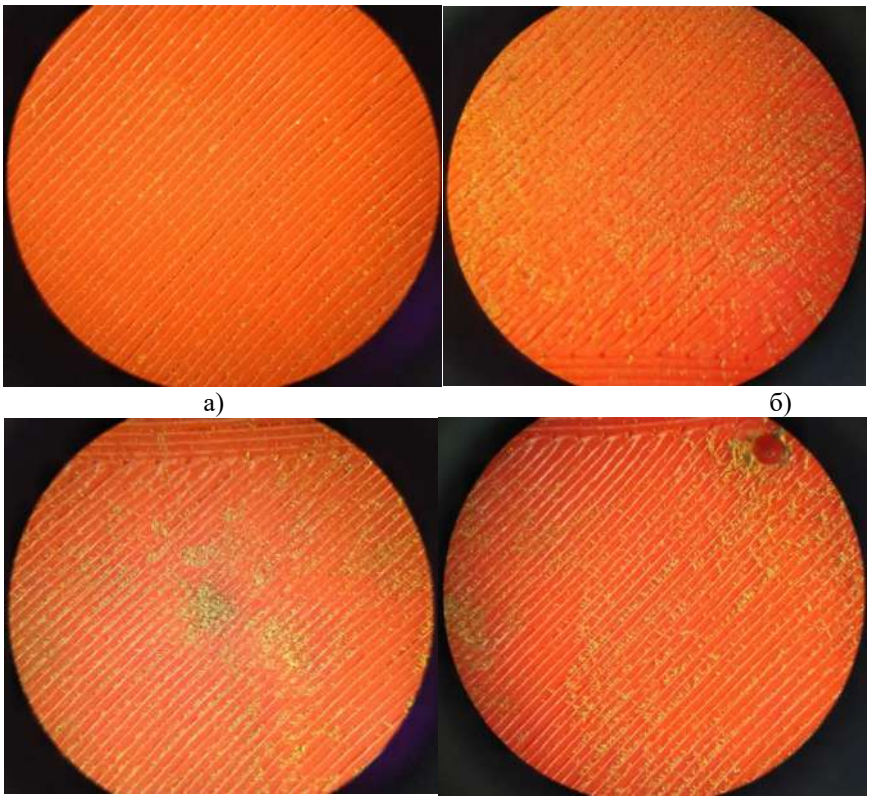


Рисунок 4 – Микроструктура поверхности лопаток ЖВН из АБС-пластика, полученных с использованием трехмерной печати. Увеличение 100^x

Заключение.

Предложен метод упрочнения поверхностей изделий из полимеров, напечатанных с использованием аддитивных технологий. Описанное поверхностное упрочнение предполагает совмещение действия магнитного и термического полей с целью внедрения частиц металлического порошка внутрь поверхности полимера. Возможный режим проведения упрочнения лопатки ЖВН, напечатанной из АБС-пластика, предполагает диффузию порошка никеля с размерами частиц 40 мкм при давлении формования 2 МПа. Предварительный нагрев пресс-формы осуществляется до температуры 160-180 °С. Выдержка пресс-формы с деталью под давлением не должна превышать 2 минуты, затем следует охлаждение на воздухе.

Дальнейшие исследования направлены на совершенствование предлагаемой технологии поверхностного упрочнения с целью расширения сферы ее применения и достижения более высоких эксплуатационных характеристик упрочняемых образцов. Также планируется исследование внедрения металлического порошка в процессе формирования изделия при аддитивном производстве, что позволит сократить число операций и производить упрочнение даже самых сложных криволинейных поверхностей.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ №20-33-90298/20, конкурс «Аспиранты», 2020 г.

Список литературы

1. Исследование магнитотермического поверхностного армирования полимерных материалов / Ю.В. Родионов, Д.В. Никитин, Н.В. Воронин, И.С. Филатов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2021. №7-2021. С. 37-39.

2. Study of Magneto-Thermal Surface Reinforcement of Polymeric Materials / Y. V. Rodionov, D. V. Nikitin, N. V. Voronin, I. S. Filatov // Chemical and Petroleum Engineering. 2021. Vol. 57. No 7-8. P. 595-600. DOI 10.1007/s10556-021-00981-2.

3. Теоретические исследования контактных и изгибных напряжений лопаток рабочего колеса и корпуса жидкостнокольцевого вакуумного насоса из полимеров / Н.В. Воронин, Ю.В. Родионов, А.И. Скоморохова [и др.] // Наука в центральной России. 2020. № 3 (45). С. 85-97.

4. R.M. Santos, G.L. Botelho, A.V. Machado, J. Appl. Polym. Sci. Symp. 116 (2010) 2005–2014.

5. A. Afshar, D. Mihut, S. Hill, J. Baqersad, J. Compos. Mater. 51 (2017) 3711–3717.

6. J.M. Pérez, J.L. Vilas, J.M. Laza, S. Arnáiz, F. Mijangos, E. Bilbao, L.M. León, J. Polym. Environ. 18 (2010) 71–78.

7. Tripathi B. S., Gupta R., Reddy S. R. N. Three-dimensional printing: Revolutionary technology for academic use & prototype development //Transactions on Intelligent Welding Manufacturing. Springer, Singapore, 2019. С. 151-161.

8. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges / T. Ngo D. [et al.] // Composites Part B: Engineering. 2018. Т. 143. С. 172-196.

9. Afshar A., Mihut D. Enhancing durability of 3D printed polymer structures by metallization //Journal of Materials Science & Technology. 2020. Т. 53. С. 185-191.

10. Полимерные нанокомпозиты и изделия на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), полученные объемной штамповкой в твердой фазе / Г. С. Баронин, В. М. Бузник, С. В. Мищенко [и др.] // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент : Материалы VIII Международной научно-инновационной молодёжной конференции, Тамбов, 27–28 октября 2016 года. Тамбов: ИП Чеснокова А.В., 2016. С. 28-33.

11. Адгезионные свойства эпоксидного олигомера, модифицированного смесью двух термопластов / В. А. Костенко, Л. С. Бичевий, Ю. А. Горбаткина [и др.] // Клеи. Герметики. Технологии. 2019. № 9. С. 10-15. DOI 10.31044/1813-7008-2019-0-9-10-15.

12. Resource-saving production technology of products made of polymeric material: problem and solution / D. Y. Kobzev, P. V. Kombarova, A. N. Blokhin [et al.] // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018 : Conference proceedings, Albena, Bulgaria, 02–08 июля 2018 года. Albena, Bulgaria: Общество с ограниченной ответственностью СТЕФ92 Технолоджи, 2018. P. 275-280. DOI 10.5593/sgem2018/6.1/S24.037.

13. Chen J., Liu B., Gao X. Thermal properties of graphene-based polymer composite materials: A molecular dynamics study //Results in Physics. 2020. Т. 16. С. 102974.

14. Основные направления совершенствования сеялок точного высева пропашных культур / А. А. Завражнов, А. И. Завражнов, В. Ю. Шепелев, А. В. Якушев // Вестник НГИЭИ. 2022. № 1 (128). С. 7-21. – DOI 10.24412/2227-9407-2022-1-7-21.

15. Интенсификация восстановления деталей сельхозмашин дисперсно-упрочненным композитным покрытием на основе хрома / Н. А. Пеньков, С. Ю. Жачкин, К. Ч. Колбая [и др.] // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2021. № 34. С. 70-72.

16. Rodionov Yu.V. Liquid ring vane vacuum pumps. Trends in development of vacuum technology (in English) // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. 2006. Т. 12. № 3-2. С. 779-784.

17. Rodionov Y.V. Novel construction of liquid ring vacuum pumps // Y.V. Rodionov, Y.T. Selivanov, D.V. Nikitin, M.V. Sychev, P.V. Kombarova // Chemical and Petroleum Engineering. 2019. Т. 55. № 5-6. С. 473-479.

18. Pneumatic system of a seeder with pneumatic sowing / V. Konovalov, A. Kravtsov, V. Zaitsev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, INTERAGROMASH 2019, Rostov-on-Don, 10–13 сентября 2019 года. Rostov-on-Don: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012131. DOI 10.1088/1755-1315/403/1/012131.

19. Влияние технологических параметров на процесс внедрения ферромагнитных материалов в поверхность термопластичных и термореактивных полимеров / Н. В. Воронин, И. С. Филатов, Ю. В. Родионов [и др.] // Наука в центральной России. 2021. № 4(52). С. 115-123. DOI 10.35887/2305-2538-2021-4-115-123.

20. Фарниев, А. С. Анализ свойств материалов, используемых в аддитивных технологиях, и особенности их влияния на формирование внутренних резьб / А. С. Фарниев, П. А. Новиков // Вестник современных технологий. 2020. № 3 (19). С. 42-46.

21. Пат. 2761191 C1 РФ, МПК C23C 26/00 C23C 24/08 C23C 14/35 C23C 4/06, Способ поверхностного упрочнения детали из полимерного материала / И.С. Филатов, Н.В. Воронин, Ю.В. Родионов, Д.В. Никитин, Г.В. Рыбин, А.В. Щегольков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». № 2021106201; заявл. 11.03.2021; опубл. 06.12.2021. Бюл. № 34.

22. Развитие и модификация магнито-термического метода упрочнения деталей машин из термопластичных полимеров / Н. В. Воронин, И. С. Филатов, Ю. В. Родионов, А. В. Щегольков // Наука и Образование. 2021. Т. 4. № 2.

References

1. Issledovanie magnitotermicheskogo poverkhnostnogo armirovaniya polimernykh materialov / Yu.V. Rodionov, D.V. Nikitin, N.V. Voronin, I.S. Filatov // Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. 2021. No. 7-2021. P. 37-39.

2. Study of Magneto-Thermal Surface Reinforcement of Polymeric Materials / Y. V. Rodionov, D. V. Nikitin, N. V. Voronin, I. S. Filatov // Chemical and Petroleum Engineering. 2021. Vol. 57. No 7-8. P. 595-600. DOI 10.1007/s10556-021-00981-2.

3. Teoreticheskie issledovaniya kontaktnykh i izgibnykh napryazhenii lopatok rabochego kolesa i korpusa zhidkostnokol'tsevogo vakuumnogo nasosa iz polimerov / N.V. Voronin, Yu.V. Rodionov, A.I. Skomorokhova [i dr.] // Nauka v tsentral'noi Rossii. 2020. No. 3 (45). P. 85-97.

4. R.M. Santos, G.L. Botelho, A.V. Machado, J. Appl. Polym. Sci. Symp. 116 (2010) 2005–2014.

5. A. Afshar, D. Mihut, S. Hill, J. Baqersad, J. Compos. Mater. 51 (2017) 3711–3717.

6. J.M. Pérez, J.L. Vilas, J.M. Laza, S. Arnáiz, F. Mijangos, E. Bilbao, L.M. León, J. Polym. Environ. 18 (2010) 71–78.

7. Tripathi B. S., Gupta R., Reddy S. R. N. Three-dimensional printing: Revolutionary technology for academic use & prototype development //Transactions on Intelligent Welding Manufacturing. – Springer, Singapore, 2019. P. 151-161.

8. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges / T. Ngo D. [et al.] // Composites Part B: Engineering. 2018. T. 143. P. 172-196.

9. Afshar A., Mihut D. Enhancing durability of 3D printed polymer structures by metallization //Journal of Materials Science & Technology. 2020. T. 53. P. 185-191.

10. Polimernye nanokompozity i izdeliya na osnove sverkhvysokomolekulyarnogo polietilena (SVMPE), poluchennye ob"emnoi shtampovkoi v tverdoi faze / G. S. Baronin, V. M. Buznik, S. V. Mishchenko [i dr.] // Sovremennye tverdofaznye tekhnologii: teoriya, praktika i innovatsionnyi menedzhment : Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-innovatsionnoi molodezhnoi konferentsii, Tambov, 27–28 oktyabrya 2016 goda. Tambov: IP Chesnokova A.V., 2016. P. 28-33.

11. Adgezionnye svoistva epoksidnogo oligomera, modifitsirovannogo smes'yu dvukh termoplastov / V. A. Kostenko, L. S. Bichevii, Yu. A. Gorbatkina [i dr.] // Klei. Germetiki. Tekhnologii. 2019. No. 9. P. 10-15. DOI 10.31044/1813-7008-2019-0-9-10-15.

12. Resource-saving production technology of products made of polymeric material: problem and solution / D. Y. Kobzev, P. V. Kombarova, A. N. Blokhin [et al.] // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018 : Conference proceedings, Albena, Bulgaria, 02–08 iyulya 2018 goda. – Albena, Bulgaria: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu STEF92 Tekhnolodzhi, 2018. P. 275-280. DOI 10.5593/sgem2018/6.1/S24.037.

13. Chen J., Liu B., Gao X. Thermal properties of graphene-based polymer composite materials: A molecular dynamics study //Results in Physics. 2020. T. 16. P. 102974.

14. Osnovnye napravleniya sovershenstvovaniya seyalok tochnogo vyseva propashnykh kul'tur / A. A. Zavrazhnov, A. I. Zavrazhnov, V. Yu. Shepelev, A. V. Yakushev // Vestnik NGIEI. 2022. No. 1(128). P. 7-21. DOI 10.24412/2227-9407-2022-1-7-21.

15. Intensifikatsiya vosstanovleniya detalei sel'khozmashin dispersno-uprochnennym kompozitnym pokrytiem na osnove khroma / N. A. Pen'kov, S. Yu. Zhachkin, K. Ch. Kolbaya [i dr.] // Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii. 2021. No. 34. P. 70-72.

16. Rodionov Yu.V. Liquid ring vane vacuum pumps. Trends in development of vacuum technology (in English) // Vestn. Tamb. gos. tekhn. un-ta. 2006. T. 12. No. 3-2. P. 779-784.

17. Rodionov Y.V. Novel construction of liquid ring vacuum pumps // Y.V. Rodionov, Y.T. Selivanov, D.V. Nikitin, M.V. Sychev, P.V. Kombarova // Chemical and Petroleum Engineering. 2019. T. 55. No. 5-6. P. 473-479.

18. Pneumatic system of a seeder with pneumatic sowing / V. Konovalov, A. Kravtsov, V. Zaitsev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, INTERAGROMASH 2019, Rostov-on-Don, 10–13 sentyabrya 2019 goda. Rostov-on-Don: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012131. DOI 10.1088/1755-1315/403/1/012131.

19. Vliyanie tekhnologicheskikh parametrov na protsess vnedreniya ferromagnitnykh materialov v poverkhnost' termoplastichnykh i termoreaktivnykh polimerov / N. V. Voronin, I. S. Filatov, Yu. V. Rodionov [i dr.] // Nauka v tsentral'noi Rossii. 2021. No. 4(52). P. 115-123. DOI 10.35887/2305-2538-2021-4-115-123.

20. Farniev, A. S. Analiz svoistv materialov, ispol'zuemykh v additivnykh tekhnologiyakh, i osobennosti ikh vliyaniya na formirovanie vnutrennikh rez'b / A. S. Farniev, P. A. Novikov // Vestnik sovremennykh tekhnologii. – 2020. – No. 3(19). – P. 42-46.

21. Pat. 2761191 C1 RF, MPK C23C 26/00 C23C 24/08 C23C 14/35 C23C 4/06, Sposob poverkhnostnogo uprochneniya detali iz polimernogo materiala / I.S. Filatov, N.V. Voronin, Yu.V. Rodionov, D.V. Nikitin, G.V. Rybin, A.V. Shchegol'kov; zayavitel' i patentoobladatel' FGBOU VO «TGTU». № 2021106201; zayavl. 11.03.2021; opubl. 06.12.2021. Byul. No. 34.

22. Razvitie i modifikatsiya magnito-termicheskogo metoda uprochneniya detalei mashin iz termoplastichnykh polimerov / N. V. Voronin, I. S. Filatov, Yu. V. Rodionov, A. V. Shchegol'kov // Nauka i Obrazovanie. 2021. T. 4. – No. 2.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Воронин Николай Владимирович – аспирант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, e-mail: voronin.nikolay.1994@yandex.ru.

Скоморохова Анастасия Игоревна – магистрант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, e-mail: nasta373@mail.ru.

Филатов Иван Сергеевич – кандидат технических наук, преподаватель Тамбовского областного государственного бюджетного профессионального образовательного учреждения «Приборостроительный колледж», Россия, г. Тамбов, e-mail: ridder@mail.ru

Родионов Юрий Викторович – доктор технических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет», Россия, г. Мичуринск, e-mail: rodionow.u.w@rambler.ru.

Никитин Дмитрий Вячеславович – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет», Россия, г. Мичуринск, e-mail: vacuum2008@yandex.ru.

Author credentials

Affiliations

Voronin Nikolay – post graduate student of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Tambov State Technical University”, Russia, Tambov, e-mail: voronin.nikolay.1994@yandex.ru.

Skomorokhova Anastasia – master's student of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Tambov State Technical University”, Russia, Tambov, email: nasta373@mail.ru.

Philatov Ivan – Candidate of Technical Sciences, Teacher of the Tambov Regional State Budgetary Professional Educational Institution "Instrument-Making College", Russia, Tambov, email: ridder@mail.ru.

Rodionov Yury – Full Doctor of Technical Sciences, Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Tambov State Technical University”, Russia, Tambov, Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Michurinsk State Agrarian University”, Russia, Michurinsk, e-mail: rodionow.u.w@rambler.ru.

Nikitin Dmitry – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Tambov State Technical University”, Russia, Tambov, Associate Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Michurinsk State Agrarian University”, Russia, Michurinsk, email: vacuum2008@yandex.ru.

Поступила в редакцию (Received): 15.03.2022 Принята к публикации (Accepted): 12.04.2022

УДК 621.9.047
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-2-134-142

МАССОПЕРЕНОС ПРИ ГАЛЬВАНИЧЕСКОМ ОСАЖДЕНИИ ПОКРЫТИЙ С ВЫРАВНИВАЮЩЕЙ ДОБАВКОЙ

[1]Жачкин Сергей Юрьевич
[2]Пеньков Никита Алексеевич
[3]Невструев Юрий Алексеевич
[1]БирюковАлександр Вячеславович
[2]Власов Дмитрий Александрович

[1]ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
[2] ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
[3]ООО «Аквапаскаль»

Реферат. *Для получения размерных герметичных гальванических покрытий при восстановлении силовой гидравлической аппаратуры важна возможность управления шероховатостью формируемых осадков с обеспечением выравнивающей способности обрабатываемых деталей. Рассматривается модель, описывающая процесс конвективной диффузии композиционных частиц в гальваническую матрицу формируемого покрытия. Установлено, что представленную задачу можно описать классическим уравнением Лапласа. Однако аналитическое решение в существующей постановке не интегрируется в квадратурах. Для его решения использован численный метод, описанный Ватсоном и Эдвардсом. Он позволяет получить связь между электрическими характеристиками поля, благодаря разложению вторичного электрического поля на первичное поле и поле поляризации. Предполагается, что диффузия выравнивающей добавки происходит в поле, подобном первичному электрическому полю, а концентрация добавки непосредственно у поверхности электрода постоянна и равна нулю. Вычисляя величину выравнивающей добавки из кривых потенциал-концентрация при постоянной силе тока, было установлено качественное совпадение расчетной выравнивающей способности с экспериментально найденными значениями для хромового электролита. Полученные в ходе исследования зависимости указывают на экспоненциальный характер изменения микропрофиля формируемого гальванического покрытия со временем электролиза как в случае положительного, так и отрицательного выравнивания. Это подтверждается*