

УДК 378.096, 621.91.01, 372.862

ББК 30.83

DOI 10.51955/2312-1327_2023_3_68

АВТОМАТИЗАЦИЯ АДДИТИВНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Николай Григорьевич Филиппенко,
orcid.org/0000-0002-7557-7774,
кандидат технических наук, доцент
Иркутский государственный университет путей сообщения,
ул. Чернышевского, 15
Иркутск-74, 664074, Россия
ifpi@mail.ru*

*Александр Валерьевич Лившиц,
orcid.org/0000-0002-0653-8472,
доктор технических наук, профессор
Иркутский государственный университет путей сообщения,
ул. Чернышевского, 15
Иркутск-74, 664074, Россия
livnet@list.ru*

*Тамара Темуриевна Чумбадзе,
orcid.org/0000-0002-1009-4616,
аспирант
Иркутский государственный университет путей сообщения,
ул. Чернышевского, 15
Иркутск-74, 664074, Россия
tamriko98@yandex.ru*

Аннотация. Использование новых современных конструкционных материалов, которые позволили бы улучшить физико-механические свойства изделий, агрегатов и узлов машино- и транспортостроения позволило бы сократить массовую долю металлов в их конструкции, что является весьма актуальной задачей. Целью данного исследования была разработка алгоритмического решения процесса автоматизированного управления технологией изготовления изделий из фотополимеров на основе найденного научно обоснованного комплекса контролируемых параметров полученных в процессе изучения физико-механических характеристик и химических свойств композитов.

Проведенные экспериментально-промышленные испытания физико-механических свойств смолы РОЕНМ R-50 позволили на практике исследовать работу алгоритма системы управления процессом фотополимеризации.

Ключевые слова: фотополимер, аддитивные технологии, автоматизация, контролируемые параметры.

AUTOMATION OF ADDITIVE PROCESSING METHODS IN THE PRODUCTION OF PRODUCTS MADE OF PHOTOPOLYMER MATERIALS

*Nikolai G. Filippenko,
orcid.org/0000-0002-7557-7774,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevskogo street,
Irkutsk-74, 664074, Russia
ifpi@mail.ru*

*Alexandr V. Livshits,
orcid.org/0000-0002-0653-8472,
Doctor of Technical Sciences, Professor
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevskogo street,
Irkutsk-74, 664074, Russia
livnet@list.ru*

*Tamara T. Chumbadze,
orcid.org/0000-0002-1009-4616,
graduate student
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevskogo street,
Irkutsk-74, 664074, Russia
tamriko98@yandex.ru*

Abstract. The use of new modern structural materials that would improve the physical and mechanical properties of products, assemblies and components of machine and transport engineering would reduce the mass fraction of metals in their design, which is a very urgent task. The purpose of this study was to develop an algorithmic solution for the automated control of the technology for manufacturing products from photopolymers based on the found scientifically based set of controlled parameters obtained in the process of studying the physical and mechanical characteristics and chemical properties of composites.

The experimental and industrial tests of the physical and mechanical properties of resin ROEHM R-50 made it possible to investigate the operation of the photopolymerization control system algorithm in practice.

Keywords: photopolymer, additive technologies, automation, controlled parameters

Введение

Технологии аддитивного производства с использованием полимерных конструкционных материалов в последние десятилетия получили широкое распространение не только в машиностроении, но и в других отраслях производства и медицины [Лазерная стереолитография..., 2018; Lipson et al., 2013]. Наиболее распространенными способами изготовления изделий являются лазерная (SLA), проекторная (DLP) и стереолитографическая технологии.

Согласно исследованию, проведенному компанией Sculpteo в 2021 году, около 70% производителей стремятся использовать аддитивные технологии для решения задач своего производства, а около половины предприятий внедряют данную технологию на основе аутсорсинга. В опросе приняли участие представители машиностроительных предприятий из 71 страны (рис. 1.).

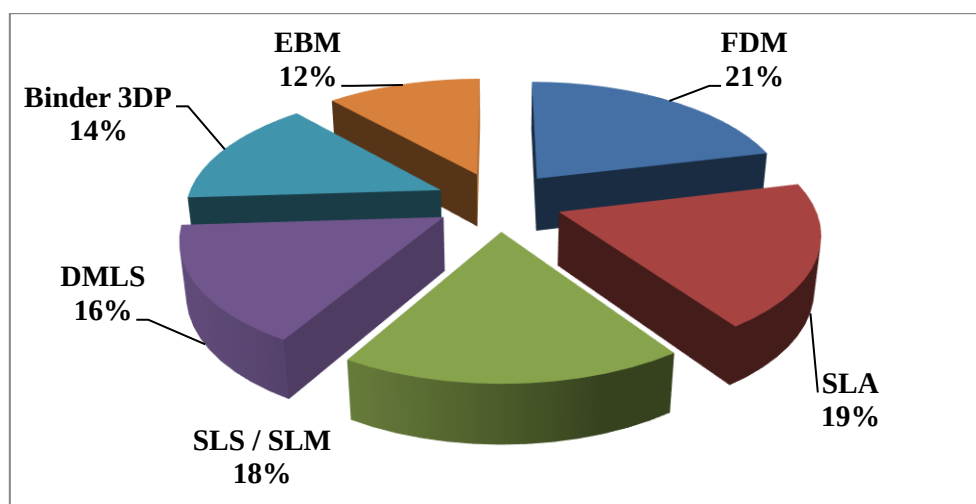


Рисунок 1 – Диаграмма использования оборудования и методов получения 3D-изделий, где: «FDM» – моделирование методом наплавления, «SLA» – лазерная стереолитография, «SLS/SLM» – селективное лазерное спекание/сплавление, «DMLS» – прямое лазерное спекание металлов, «Binder 3DP» – струйное нанесение связующего, «EBM» – электронно-лучевая плавка

Анализ данных позволил определить рейтинг используемого оборудования и методов получения 3D-изделий.

Материалы и методы

Принимая во внимание исследования по аддитивным технологиям в современном производстве деталей приборостроения и точного машиностроения, проведенные в Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю. А [Финогеев и др., 2020], где детально были рассмотрены целый ряд используемых методов, было определено, что развитие данных технологий ограничивается выпуском единичных изделий прикладного назначения. Анализ причин такого состояния дел показывает, что весьма актуальному применению аддитивного производства в машиностроении препятствует низкое качество изделий [Раевский и др., 2016; Рихирев, 2020] в связи с отсутствием автоматизированного контроля процесса полимеризации при производстве 3D-изделий. Поэтому целью настоящего исследования была работа, направленная на создание алгоритма автоматизированной системы управления процесса фотополимеризации.

Первоначальной подзадачей, в связи с этим, стало определение управляемых и контролируемых параметров процесса фотополимеризации.

Придерживаясь основного принципа построения систем АСУ технологических процессов – органической интеграции в технологические системы и системы управления существующего аддитивного оборудования, было определено, что управляемым параметром может служить время экспозиции ($T_{\text{эксп}}$). Более того, необходимо отметить, что данный показатель штатно используется в любых типах аддитивного оборудования.

Решению подзадачи по определению комплекса контролируемых параметров АСУ ТП предшествовала работа по изучению физики процесса фотополимеризации.

Процесс фотополимеризации состоит из 3-х последовательных реакций:

- инициирование цепи – образование активного центра (наибольшая энергия активации);
- рост цепи – последовательное присоединение мономеров к активному центру (малая энергия активации, протекает с выделением тепла (экзотермическая реакция) и протекает с большой скоростью);
- обрыв цепи – гибель активного центра.

При инициировании цепи сначала генерируются радикалы инициатора, которые присоединяются к мономеру, образуя первичный мономерный радикал, схема реакции представлена на рисунке 2 [Методы получения..., 2018; Boissonneault, 2020; Development..., 2020].

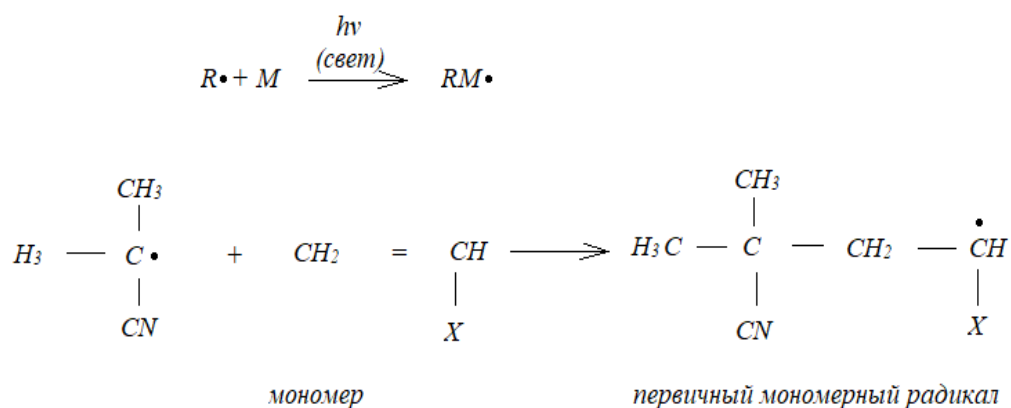


Рисунок 2 – Схема инициирования цепи

При процессе роста цепи мономеры поочередно присоединяются к активному центру первичного мономерного радикала по данной схеме (рис. 3):

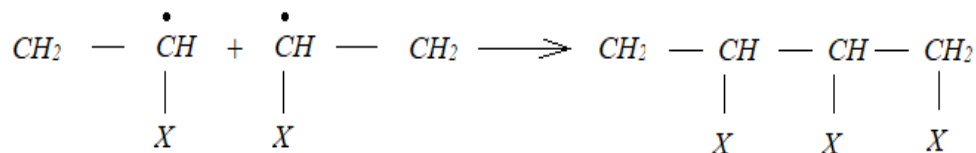


Рисунок 3 – Схема роста цепи

Обрыв цепи происходит в результате гибели активных центров, показанных на рисунке 4:

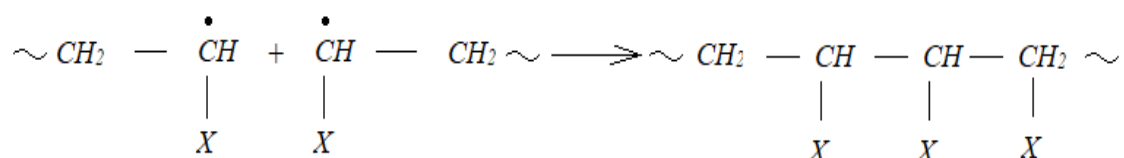


Рисунок 4 – Схема распада цепи

Анализ физико-химических процессов фотополимеризации композитов показал, что при производстве 3D- изделий на любом типе оборудования используется процесс засветки (экспозиция). Дальнейшие процессы инициирования, роста и обрыва цепи идут в фотополимере с поглощением УФ-излучения, при этом реакция сопровождается выделением тепла (экзотермическая реакция). Количественные показатели тепловыделения в задачи настоящего исследования не входили.

Тем не менее, проведенный анализ позволил выдвинуть гипотезу о возможности организации автоматизированной системы управления процессом полимеризации фотополимера по температуре композиции в технологической системе ($T_{\text{пол}}$).

Этапы технологического процесса фотополимеризации композита (инициирование, рост, распад) с целью контроля качества изделия можно контролировать в реальном режиме времени по динамике температурных изменений в композиции $T_{\text{пол}}/dt$, используя принцип экстремального управления [Восстановление..., 2012; Высокочастотная электротермическая обработка..., 2014].

Таким образом, теоретическое обоснование найденных контролируемых и управляемых параметров аддитивного изготовления изделий из фотополимеров позволило решить задачу алгоритмизации автоматизированного управления процессом полимеризации композиции при изготовлении 3D-деталей, используемых в машиностроении (рис. 5).

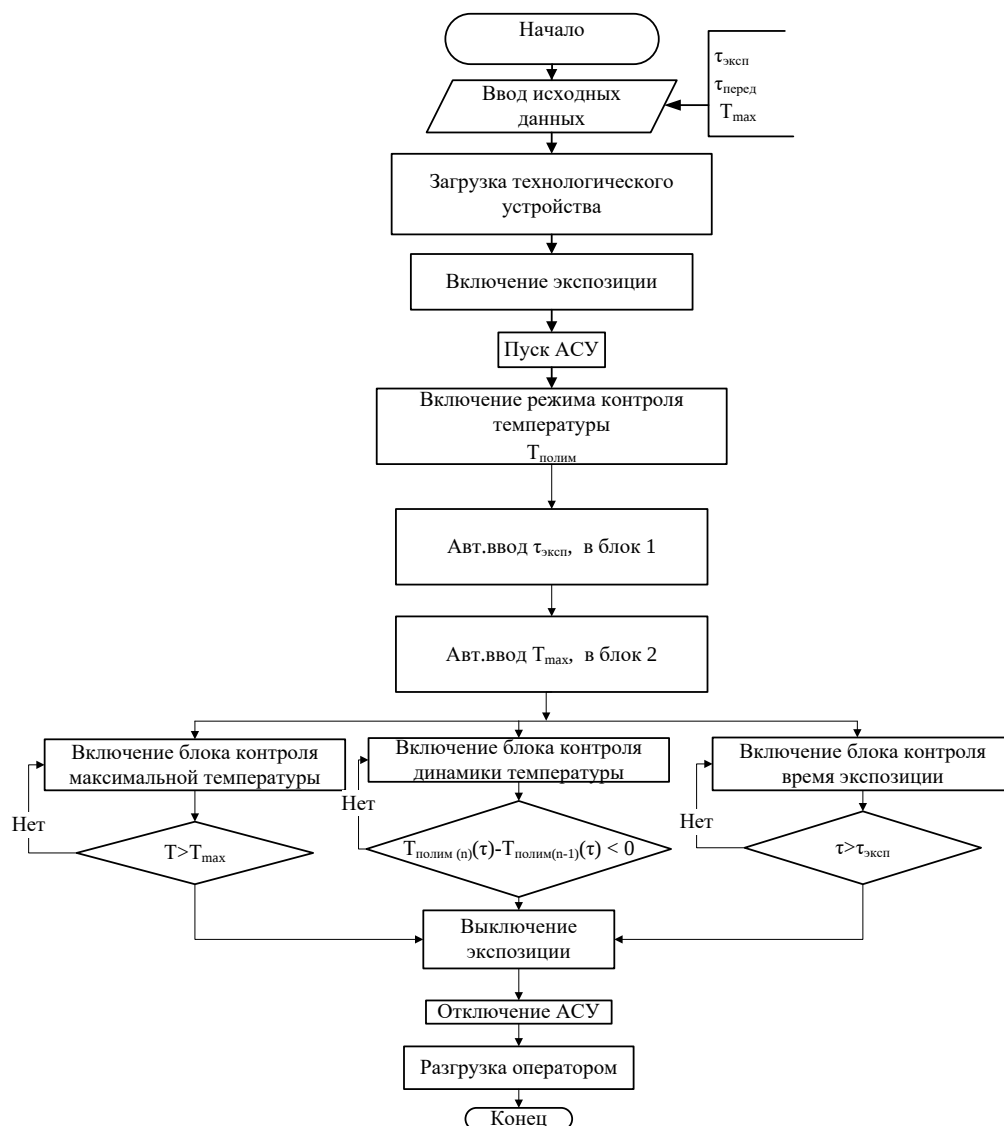


Рисунок 5 – Алгоритм автоматизированного управления процессом полимеризации композиции

Особенность работы алгоритма заключается в том, что после ввода основных данных о времени экспонирования, времени передержки и максимальной температуры фотополимерной композиции ($\tau_{\text{эксп}}$, $\tau_{\text{перед}}$, T_{max}) производится включение автоматизированной системы управления процессом изготовления.

Необходимо отметить, что включению АСУ ТП предшествует загрузка технологического устройства, выполняемая оператором. Описание данного процесса не приводится, т.к. разработанная автоматизированная система универсальна, а процесс подготовки индивидуален для различных типов аддитивного оборудования.

Необходимо отметить, что контроль температуры может быть организован как контактным, так и бесконтактным способом, причем последний более предпочтителен, т.к. датчики температуры не будут оказывать влияния на процесс полимеризации, что особенно необходимо учитывать при изготовлении небольших по габаритам изделий. Тем не менее, при организации подсистемы

измерения температуры бесконтактным способом потребуются более точное позиционирование устройства приема данных, что также зависит как от размеров изделия, так и от самой технологической системы используемого оборудования.

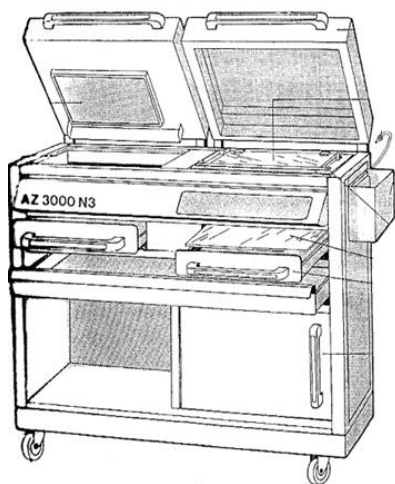
Время экспонирования и максимальная температура материала ($\tau_{\text{эксп}}$, T_{max}) определяются на основе паспортных данных используемого фотополимера или экспериментальных показателей, полученных при изготовлении деталей из композиций.

Дальнейший процесс АСУ ТП был условно разделен на этапы многооперационного выполнения. Показатели данных по максимальной температуре и времени экспонирования (T_{max} , $\tau_{\text{эксп}}$) были определены как дублирующие, позволяющие системе завершить процесс фотополимеризации в случае неудовлетворительной работы основного блока АСУ, основанного на принципе экстремальной системы управления.

Дискуссия

Как было определено выше, технологическая система претерпевает значительные температурные изменения вследствие физико-химических процессов, происходящих в полимерном материале при инициировании, росте и распаде мономеров.

Контрольные показатели температуры полимера в процессе его фотопреобразования были получены в ходе проведения экспериментальных исследований на промышленной установке марки AZ3000 с использованием полимера ROEHM R-50 и образцов 25x25x3 мм (рис 6 а, в, с, соответственно). Время засветки варьировалось от 27 до 30 с.



а)



в)



с)

Рисунок 6 – Промышленная установка фотополимеризации а, полимер в, образец с

Результаты динамики температурных изменений, полученных в ходе эксперимента представлены на рисунке 7.

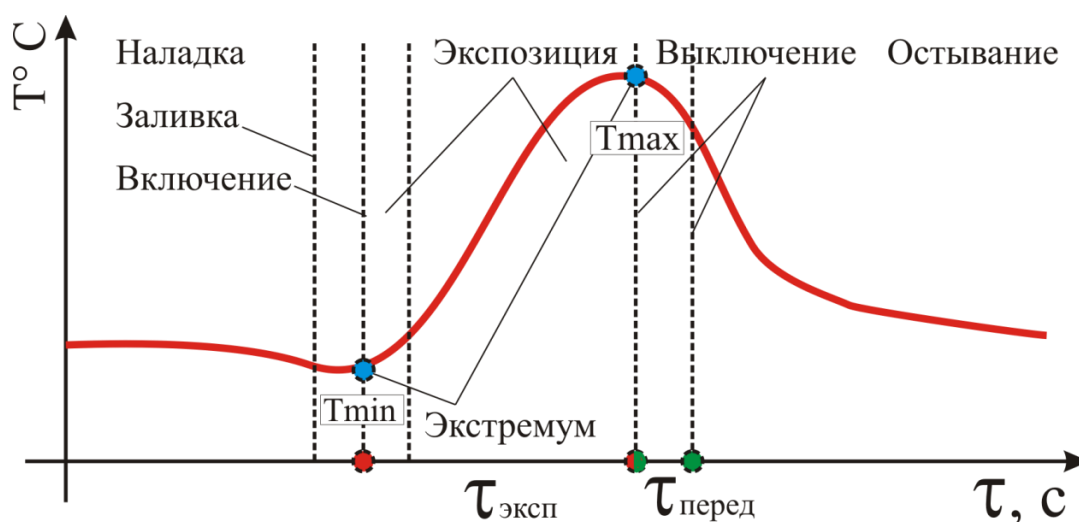


Рисунок 7 – Динамика температурных изменений

Анализ полученных данных доказывает, что выдвинутая гипотеза и разработанный алгоритм АСУ ТП позволили по динамике температурных изменений произвести уверенный контроль максимума температуры $T_{\max}$ (экстремума). Дополнительная организация подблока контроля минимального значения температуры $T_{\min}$ (в алгоритме не представлен) позволяет автоматизировать процесс контроля вспомогательного времени наладки технологической системы. Также необходимо отметить, что контроль максимального нагрева полимерной композиции в процессе ее фотополимеризации не всегда идентифицирует окончание процесса полного образования полимера, что негативно сказывается на качестве изготавливаемых изделий. Поэтому в алгоритме предусмотрено введение дополнительного времени передержки $\tau_{\text{перед}}$, значение которого определяется на основе экспериментальных данных.

Необходимо отметить, что проведенные предварительные исследования полимеризации фотополимера на основе акрилата показали, что это время составляет 4 секунды, но окончательная рекомендация данного показателя требует дополнительных изысканий, и поэтому в представленном алгоритме оно дано только как вариативный показатель.

Проведенные экспериментальные исследования твердости полимера показали, что контроль времени фотополимеризации только по времени экспозиции, как это предусматривается в существующих аддитивных установках (рис. 8, нижний график, 3), позволил получить твердость 109,12 НЛ. Увеличение времени экспозиции (на графике не представлено) не привело к увеличению прочностных характеристик материала. Использование автоматизированного контроля по экстремуму температуры с последующей дополнительной засветкой (передержкой) позволило получить изделия повышенной твердости 113,29 НЛ и 117,05 НЛ соответственно (рис. 8, график 2 и 1).

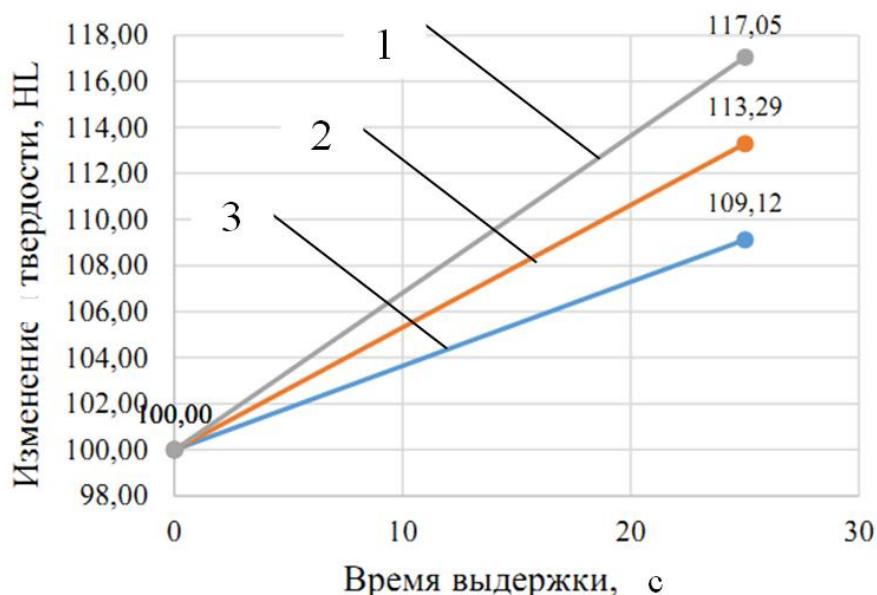


Рисунок 8 – Экспериментальные исследования твердости полимера

Заключение

Таким образом, проведенные исследования позволили:

- обосновать комплекс контролируемых параметров процесса фотополимеризации при изготовлении деталей аддитивными технологиями, в качестве которых были взяты: время полимеризации и динамика температурных изменений в материале;
- разработать алгоритм автоматизированной системы экстремального управления технологическими процессами изготовления изделий аддитивными технологиями с использованием фотополимеров и их композитов;
- идентифицировать в автоматическом режиме начало и окончание процесса полимеризации, повысив механические характеристики изделий, что позволяет утверждать о возможности применения аддитивных технологий при производстве деталей машино- и транспортостроения.

Библиографический список

- Восстановление полиамидных сепараторов подшипников буксового узла подвижного состава ОАО РЖД / И. С. Думчев, А. Г. Ларченко, С. И. Попов [и др.] // Молодой ученый. 2012. № 12. С. 48-51. EDN RFYKFD.
- Высокочастотная электротермическая обработка неметаллического вторичного сырья / А. В. Лившиц, Н. Г. Филиппенко, А. Г. Ларченко, С. Н. Филатова // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 6. С. 55-65. DOI 10.7463/0614.0712029. EDN STAQZL.
- Лазерная стереолитография: состояние и перспективы / С. В. Камаев, М. А. Марков, А. Н. Никитин, М. М. Новиков // Аддитивные технологии. 2018. № 4. С. 44-48.
- Методы получения керамических композитных мембран с нано- и микропорами / Е. О. Рыбина, Ю. М. Аверина, Г. Е. Калякина, Е. Н. Субчева // Евразийское Научное Объединение. 2018. № 6-1(40). С. 41-43. EDN XTCKSL.
- Раевский Е. В. Технология лазерного спекания металла вышла на новый уровень промышленного применения / Е. В. Раевский, А. Л. Цыганкова // Аддитивные технологии. 2016. № 1. С. 13-15.

Рихирев М. И. Цифровая аддитивная линейка // Аддитивные технологии. 2020. № 3. С. 18-26.

Финогеев Д. Ю. Аддитивные технологии в современном производстве деталей точного машиностроения / Д. Ю. Финогеев, О. П. Решетникова // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 3 (86). С. 63-71. EDN QHXXJP.

Boissonneault T. Metal AM Focus 2020 // Additive manufacturing industry: metal. 3D Printing Media Network, 2020. 27 с.

Development of nanofiltration ceramic membrane production technology / Y. M. Averina, A. Y. Kurbatov, D. A. Sakharov, E. N. Subcheva // Glass and Ceramics. 2020. Vol. 77. № 3-4. P. 98-102.

Lipson H. Fabricated: The new world of 3D printing / Lipson H., Kurman M. John Wiley & Sons Limited, 2013. 320 с.

References

Averina Y. M., Kurbatov A. Y., Sakharov D. A., Subcheva E. N. (2020). Development of nanofiltration ceramic membrane production technology. *Glass and Ceramics*. 77(3-4): 98-102.

Boissonneault T. (2020). Metal AM Focus. *Additive manufacturing industry: metal*. 3D Printing Media Network, 2020. 27 с.

Dumchev I. S., Larchenko A. G., Popov S. I., Filippenko N. G., Livshits A. V. (2012). Restoration of polyamide separators of bearings of the axle box assembly of rolling stock of JSC Russian Railways. *Young Scientist*. 12: 48-51. (In Russian)

Finogeev D. Yu., Reshetnikova O. P. (2020). Additive technologies in modern production of precision engineering parts. *Bulletin of the Saratov State Technical University*. 3 (86): 63-71. (In Russian)

Kamaev S. V., Markov M. A., Nikitin A. N., Novikov M. M. (2018). Laser stereolithography: state and prospects. *Additive technologies*. 4: 44-48. (In Russian)

Lipson H., Kurman M. (2013). Fabricated: The new world of 3D printing. John Wiley & Sons Limited. 2013. 320 p.

Livshits A. V., Filippenko N. G., Larchenko A. G., Filatova S. N. (2014). High-frequency electrothermal processing of nonmetallic secondary raw materials. *Science and Education: scientific edition Bauman Moscow State Technical University*. 6: 55-65. (In Russian)

Raevsky E. V., Tsygankova A. L. (2016). The technology of laser sintering of metal has reached a new level of industrial application. *Additive technologies*. 1: 13-15. (In Russian)

Rikhirev M. I. (2020). Digital additive ruler. *Additive technologies*. 3: 18-26. (In Russian)

Rybina E. O., Averina Yu. M., Kalyakina G. E., Subcheva E. N. (2018). Methods of obtaining ceramic composite membranes with nano- and micropores. *Eurasian Scientific Association*. 6-1(40): 41-43. (In Russian)