



Некоторые аспекты контроля процесса фотополимеризации в аддитивных технологиях

Н.Г. Филиппенко^{1✉}, С.К. Каргапольцев², Т.Т. Чумбадзе³

^{1,3}Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Основная цель данного исследования заключалась в разработке технологического подхода организации автоматизированного контроля процесса производства изделий из фотополимеров. Для идентификации начала и окончания технологического процесса полной полимеризации изучаемых изделий был предложен и применялся термометрический анализ с использованием разработанного авторами автоматизированного лабораторного стенда на базе промышленной установки аддитивной полимеризации AZ3000. Для разработки алгоритма работы был использован принцип экстремального управления. Изготовление образцов размерами 25x25x3 мм производилось с применением широко используемого материала фотополимерной композиции марки ROEHM R-50. Авторами были научно обоснованы контролируемые параметры процесса фотополимеризации, а именно: температура в активной зоне и на поверхности изделия. Разработанный авторами алгоритм, реализованный в виде программного комплекса, написанного для процессора AtMega 328 на языке программирования C++ в среде AVR Studio, позволил уверенно контролировать начало и окончание процесса полной полимеризации изделия. Были изучены прочностные характеристики образцов из фотополимерных материалов. Установлено, что твердость образцов из фотополимерных материалов увеличилась с 109,12 до 117,5НЛ. Это позволило доказать функционирование разработанного алгоритма системы управления процессом фотополимеризации. Апробация разработанного технологического подхода и алгоритма автоматизированного контроля процесса производства изделий из фотополимеров с использованием аддитивных технологий позволяет сделать вывод о расширении возможностей получения деталей с определенными заранее прочностными характеристиками. Использование таких деталей открывает новый потенциал выбора фотополимерных материалов для изготовления изделий в различных отраслях машиностроения, включая транспорт и авиацию.

Ключевые слова: аддитивные технологии, фотополимеры, контрольные операции, автоматизация

Для цитирования: Филиппенко Н.Г., Каргапольцев С.К., Чумбадзе И.Т. Некоторые аспекты контроля процесса фотополимеризации в аддитивных технологиях // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 238–246. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-238-246>. EDN: NWEOCR.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

A few aspects of controlling the photopolymerisation process in additive manufacturing

Nikolay G. Filippenko^{1✉}, Sergey K. Kargapoltshev², Tamara T. Chumbadze³

^{1,3}Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. This study is aimed at developing a technological approach for managing the automated control of the production process of photopolymer-based products. Thermometric analysis was proposed and used to identify the onset and completion of the polymerisation process of the studied products using a home-built automated laboratory setup based on the industrial additive polymerisation unit AZ3000. The principle of extremal control was used to develop the operation algorithm. Samples measuring 25x25x3 mm were manufactured from the extensively used photopolymer composite ROEHM R-50. The controlled parameters of the photopolymerization process, including the temperature in the active zone and on the product surface, were scientifically justified. The developed algorithm, implemented as a software package written for the

AtMega 328 processor in C++ within the AVR Studio environment, offers precise control over the onset and completion of the polymerisation process within the product. The structural characteristics of the test photopolymer materials were studied. It was found that the hardness of the photopolymer samples increased from 109.12 to 117.5 HL. This demonstrated the functionality of the developed algorithm for the control system of the photopolymerisation process. The testing of the developed technological approach and algorithm for automated control of additive manufacturing using photopolymer materials indicates that it is possible to obtain components with predetermined strength characteristics. The use of such components adds a new dimension to the selection of photopolymer materials for the manufacture of products in various fields of mechanical engineering, including transport and aviation.

Keywords: additive technologies, photopolymers, check-out operations, automation

For citation: Filippenko N.G., Kargapoltsev S.K., Chumbadze T.T. A few aspects of controlling the photopolymerisation process in additive manufacturing. *iPolytech Journal*. 2024;28(2):238-246. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-238-246>. EDN: NWEOCR.

ВВЕДЕНИЕ

На рубеже XX – начале XXI в. революционное распространение получили технологии аддитивного производства [1]. Они активно используются при выпуске изделий не только в машиностроении, но и нашли применение в трансплантологии, стоматологии и других областях медицины [2, 3]. Среди наиболее популярных методов производства изделий выделяются проекторная DLP (от англ. Digital Light Processing), лазерная SLA (от англ. Stereolithography) и стереолитографическая технологии.

Из проведенного исследования компанией Sculpteo в 2021 г. следует, что примерно 70% производственных компаний стремятся интегрировать технологии 3D-печати в ремонтные, сборочные и выпускаемые производства. Также было отмечено, что около 50% промышленных предприятий отказываются от вспомогательных производств и эти функции делегируют сторонним организациям (аутсоринг), специализирующихся на аддитивных технологических производствах. При этом основная цель такой организации производства – сосредоточение на основной деятельности компании. Опрос показывает, что особенно этому подвержены машиностроительные предприятия с активным стремлением к узконаправленному ассортименту выпускаемой продукции. Таким образом, появились предпосылки выхода на рынок производств, выпускающих единичные и мелкосерийные изделия большого наименования. Технологическая подготовка предприятий такого вида на современном этапе ориентируется на оборудование нового типа для 3D-печати, выгодно отличающегося от классическо-универсальных металлообрабатывающих станков. Существует несколько типов

аддитивного оборудования, в зависимости от технологий получения 3D-изделий.

При этом необходимо отметить, что процент брака изделий, изготовленных по аддитивным технологиям, превышает количество бракованных деталей, выполненных с применением устоявшихся технологических процессов, и может достигать до 12%.

Опрос показал, что наиболее применяемыми методами получения изделий с использованием аддитивных технологических процессов являются следующие, %: полимеризация смолы стереолитографией – 19; лазерное спекание порошка полимера – 18; выборочные расплавления и сплавления металлических частиц – 16; впрыск связующего вещества – 14; электронно-лучевая плавка металла – 12.

Несложно определить, что наиболее востребованным методом аддитивной технологии является стереолитография (рис. 1), технология которой и была взята в качестве основной для определения причин низкого качества выпускаемой продукции.

На основании проведенных исследований [4, 5], авторы которых подробно рассматривали различные методы аддитивного производства в современном производстве, было установлено, что развитие этих технологий рентабельно только при производстве единичных изделий и опытных образцов.

Причина текущего положения дел заключается в том, что использование аддитивного производства сталкивается с проблемой низкого качества изделий [6, 7], что обусловлено отсутствием объективного контроля процесса аддитивной полимеризации. В связи с этим целью данного исследования состояла в разработке системы контроля и управления технологическим процессом аддитивной фотополимеризации.

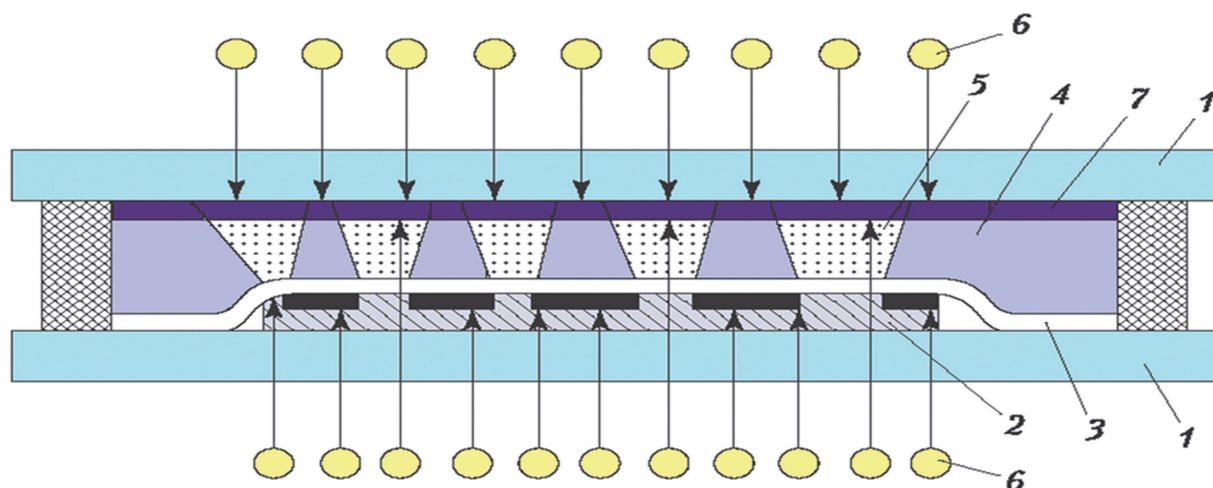


Рис. 1. Стереолитографический метод аддитивной технологии: 1 – стекло нижнее; 2 – негатив; 3 – защитная пленка; 4 – фотополимер; 5 – отвержденная композиция; 6 – ультрафиолетовые (УФ) лампы засветки; 7 – основа полимеризуемой детали
Fig. 1. Stereolithographic method of additive technology: 1 – bottom glass; 2 – negative; 3 – protective film; 4 – photopolymer; 5 – cured composition; 6 – ultraviolet lamps; 7 – polymerized part base

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первоначальной задачей было определение управляемых и контролируемых параметров технологического процесса фотополимеризации.

Беря за основу принцип построения систем автоматизированного управления технологическими процессами и его оборудованием, мы придерживались правила интеграции разрабатываемых систем контроля и управления в существующие системы. Анализ штатно установленных систем управления показал, что в качестве управляемых параметров выступает наряду с другими и время экспозиции ($T_{\text{эксп}}$). Необходимо отметить, что контроль времени экспозиции стандартно используется во всех моделях аддитивного оборудования.

Хотелось бы отметить, что работе по определению контролируемых параметров технологического процесса предшествовало исследование физики процесса фотополимеризации [4, 5].

Было определено, что процесс фотополимеризации включает в себя следующие комплексные реакции:

- инициирование активного центра с высокой энергией активации (рис. 2);
- последовательный рост цепи с присоединением мономеров к активному центру с низкой энергией активации. Важно отметить, что эта реакция идет с выделением тепла (экзотермическая реакция) и происходит с высокой скоростью (рис. 3);
- разрушение активного центра и обрыв цепи (рис. 4) [8–13].

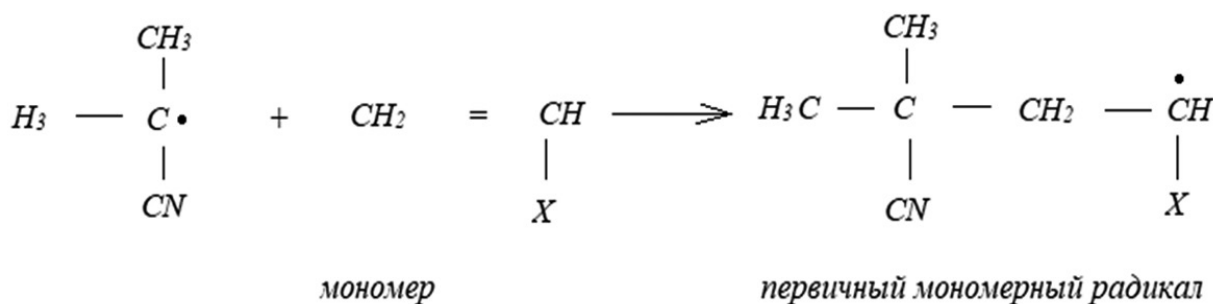
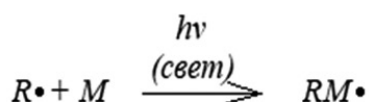


Рис. 2. Инициирование активного центра с высокой энергией активации
Fig. 2. Initiation of an active center with the high activation energy

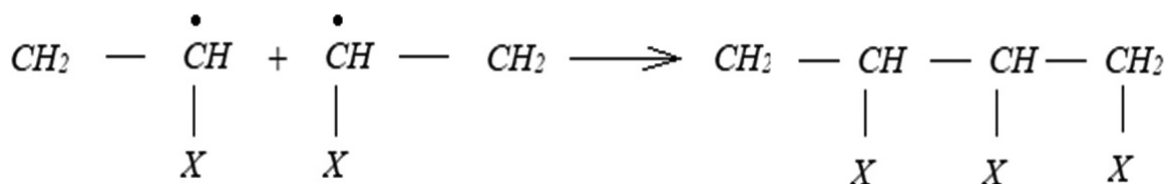


Рис. 3. Последовательный рост цепи

Fig. 3. Sequential chain growth

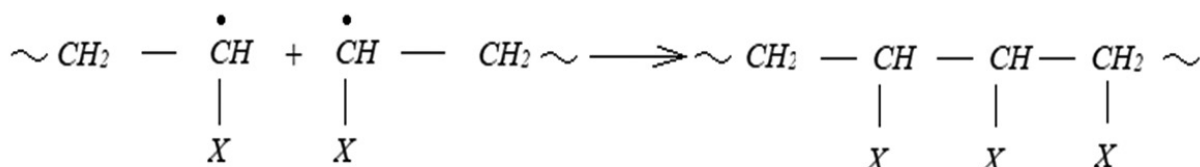


Рис. 4. Обрыв цепи после разрушения активных центров

Fig. 4. Chain breaking after active center destruction

Физика процесса фотополимеризации композитов была проанализирована и, в соответствии с аналогичными выводами, полученными авторами в работах [14–16], было определено, что рост макромолекул после инициирования реакции полимеризации УФ-излучением сопровождается выделением тепловой энергии T_{\max} (экзотермическая реакция). Также отмечается, что прекращение роста и разрыв цепи происходит с поглощением тепла T_{\min} (эндотермическая реакция). Определенные выше свойства процесса фотополимеризации позволили выдвинуть гипотезу о возможности организации контроля технологии его получения, основанного на термометрическом методе. Учитывая, что определение абсолютных значений T_{\max} и T_{\min} не являлось задачей настоящего исследования, т.к. эти показатели зависят от многих факторов, было принято решение организовать контроль процесса по принципу экстремального управления с регистрацией средней температуры технологической системы ($T_{\text{полим}}$).

Идентификация стадий (инициация, рост, затухание) технологического процесса фотополимеризации композитов с целью контроля качества продукции может быть организована в режиме реального времени по динамике изменения температуры композита, т.е. по определению экстремумов $T_{\text{полим}}/dt$ [17, 18].

Таким образом, найденное обоснование контролируемых параметров технологического процесса фотополимеризации в УФ-излучающей экспонирующей камере (технологической системе) позволило разработать

алгоритм контроля аддитивного изготовления 3D-деталей (рис. 5).

Отличительной особенностью данного алгоритма является его универсальность, т.к. он был построен по адаптивной системе управления (АСУ). Заданными параметрами являются только граничные значения времени и температуры ($T_{\text{эксп}}$, $T_{\text{задержки}}$, T_{\max}), а непрерывный контроль осуществлялся, как уже было сказано ранее, по динамике температуры полимера в технологической системе $T_{\text{полим}}/dt$.

Необходимо отметить, что перед активацией АСУ (см. рис. 5) технологическим процессом происходит загрузка технического оборудования оператором. В работе это не описывается, поскольку процесс зависит от конкретного типа изделия и оборудования, а предлагаемый алгоритм контроля и управления носит универсальный характер.

Исходные данные по температуре T_{\max} и времени экспозиции $T_{\text{эксп}}$ фотополимеров определялись исходя из данных, предоставляемых производителем (паспортные данные). Также их значения определялись на основании экспериментальных данных, полученных авторами и другими исследователями [19].

Предусмотренные алгоритмом контрольные операции, процесс аддитивной фотополимеризации выполнены по многозадачной схеме, когда наряду с контролем допустимой температуры нагрева полимера T_{\max} и заданного времени экспонирования $T_{\text{эксп}}$ определяется экстремум $T_{\text{полим}}(n)(T) - T_{\text{полим}}(n-1)(T) < 0$, который и является основным показателем окончания процесса полимеризации.

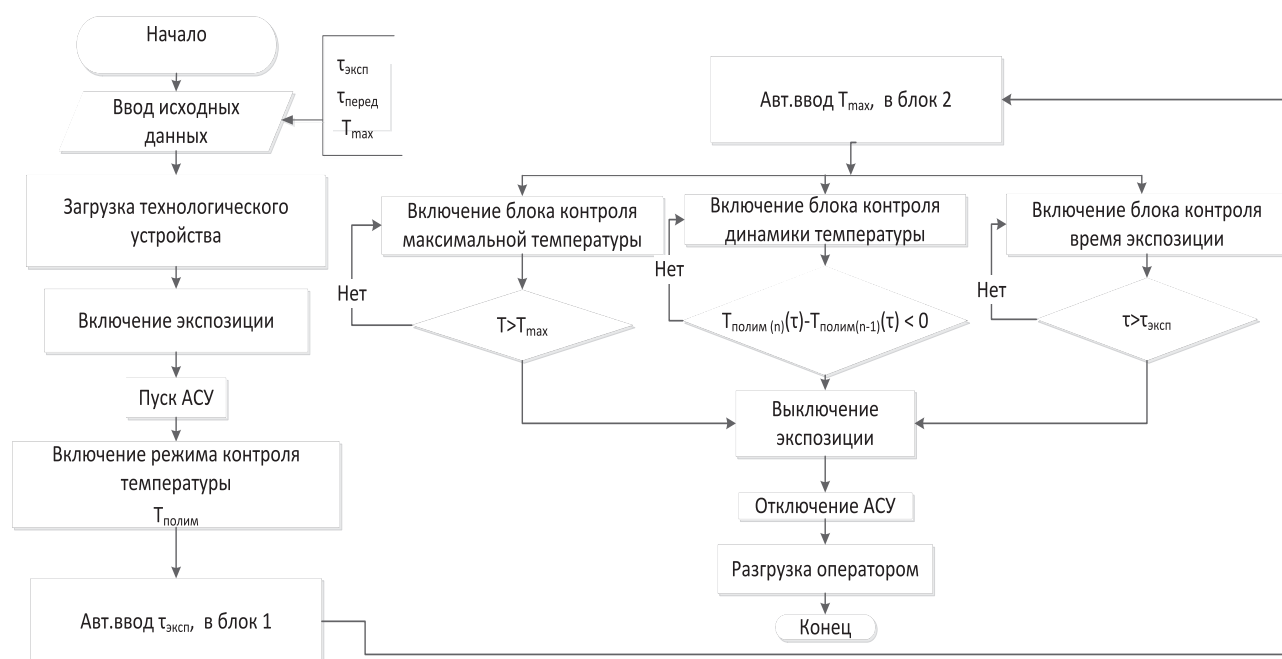


Рис. 5. Алгоритм контроля аддитивного изготовления 3D-деталей

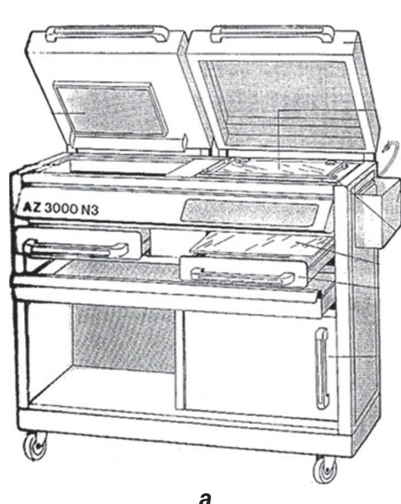
Fig. 5. Control algorithm for additive manufacturing of 3D parts

Как было сказано ранее, полимерные материалы подвержены воздействию различных факторов, изменяющих их физико-химические свойства. Таким образом, температурные изменения, происходящие в фотополимерных материалах в процессе их инициализации и деградации, происходят с различными непостоянными показателями, в том числе и для одинаковых марок материала.

Поэтому экспериментальные исследования проводились с материалом марки ROEHM, взятого из одной партии, одного

времени выпуска фотополимера. Натурные испытания осуществлялись на промышленном оборудовании модели AZ3000. Количество образцов варьировалось от 5 до 7 шт. в серии. Форма образцов была выбрана квадратной со стороной 25 мм. Толщина образцов составляла 3 мм и определялась двумя специальными вставками между основным и покрывным стеклом (рис. 6 а, в, с).

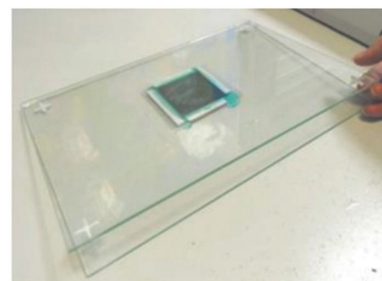
Время экспонирования определялось в соответствии с рекомендациями, указанными в паспорте на ROEHM и составляло от 26 до 30 с.



а



б



с

Рис. 6. Промышленная установка модели AZ3000 (а); фотополимерный материал ROEHM (б); полученный прямоугольный образец 25x25x3 мм (с)

Fig. 6. Industrial installation of the AZ3000 model (а); ROEHM photopolymer material (б); resulting rectangular sample with the size range of 25x25x3 mm (с)

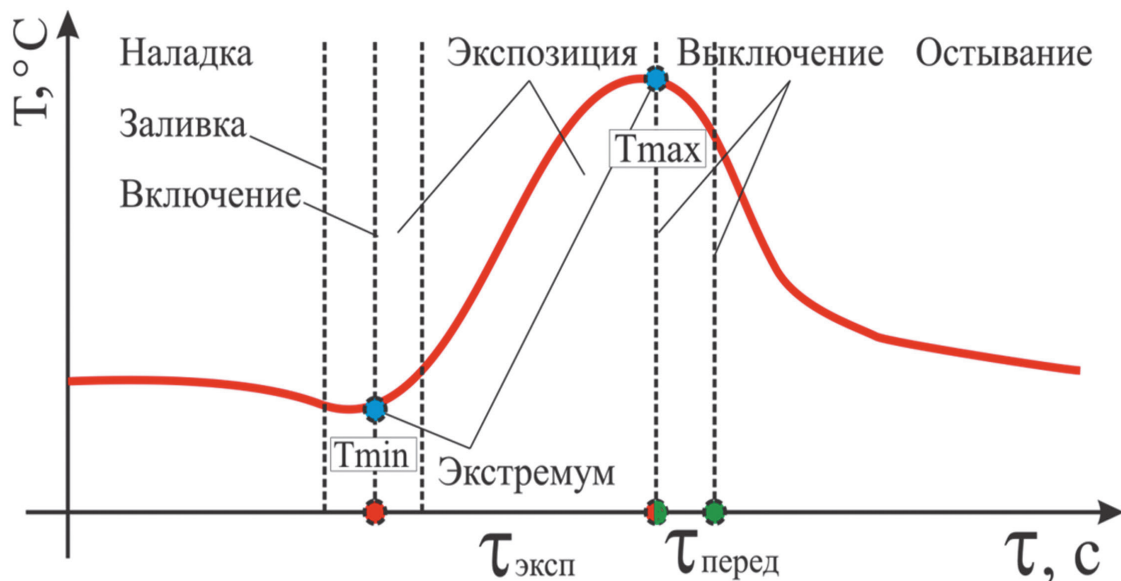


Рис. 7. Результаты изменения температуры образца в процессе фотополимеризации
 Fig. 7. Results of sample temperature variation under photopolymerization

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты изменения температуры образца в процессе фотополимеризации показаны на рис. 7.

Анализ данных показывает, что в момент наладки и заливки фотополимера в форму (крайний левый период процесса) фиксируется минимальная температура T_{\min} , что идентифицируется системой контроля технологического процесса как первый экстремум, или начальный этап работы. Далее, включается операция засветки и контролируется заданное время экспонирования $T_{\text{эксп}}$. При этом система контроля идентифицирует окончание полимеризации по второму экстремуму температуры, по максимальному его значению T_{\max} . Ввиду низкого коэффициента теплопроводности полимеров получаемый показатель второго экстремума температуры не всегда идентифицирует окончание технологического процесса образования готового изделия, поэтому алгоритм предусматривает организацию процесса передержки, время которого $T_{\text{перед}}$ определяется заранее на основе опыта оператора или экспериментов. Так, для фотополимера марки ROEHM и прямоугольных образцов оно составило $T_{\text{перед}} = 4$ с.

Критерием показателя качества получения образцов из фотополимера был выбран один из показателей его механических свойств – твердость. Эксперименты пока-

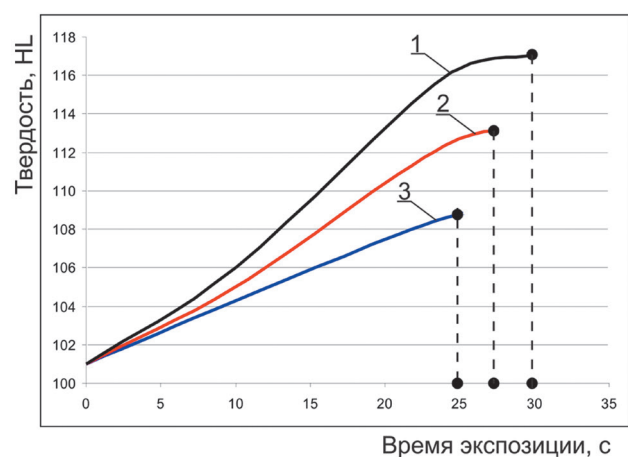


Рис. 8. Твердость изделий из фотополимеров
 Fig. 8. Hardness of photopolymer products

зали, что твердость, полученная без контроля, определяемого алгоритмом, составила 109,12 НЛ. Образец был изготовлен только при контроле регулируемого времени фотополимеризации (экспозиции), как это предусмотрено существующими технологиями аддитивного оборудования (рис. 8, нижний график 3). Дальнейшее увеличение времени облучения (не показано на графике) привело к охрупчиванию и деструкции материала.

Окончание процесса экспонирования фотополимера при достижении значения температуры (экстремум температуры), равной первому максимуму, увеличил твердость изделий до 113,29 НЛ (рис. 8, график 2). Проведенный технологический процесс с

контролем процесса фотополимеризации и его окончанием после дополнительного облучения (перезэкспонирование) позволил увеличить твердость образца до 117,05 НЛ (рис. 9, график 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследование возможности контроля и управления технологическим процессом аддитивной фотополимеризации по экстремальным температурам технологической системы позволили:

– доказать правильность выбора температуры как показателя контроля технологического процесса аддитивной фотополимеризации;

– разработать алгоритм контроля и управления технологическим процессом полимеризации фотокомпозиционных полимерных материалов;

– определить дополнительные возможности использования аддитивных технологий для изготовления деталей с улучшенными механическими свойствами изделия.

Список источников

1. Vyavahare S., Teraiya S., Panghal D., Kumar S. Fused deposition modelling: a review // *Rapid Prototyping Journal*. 2020. Vol. 26. Iss. 1. P. 176–201. <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2019-0106>.
2. Камаев С.В., Марков М.А., Никитин А.Н., Новиков М.М. Лазерная стереолитография: состояние и перспективы // *Аддитивные технологии: настоящее и будущее: сб. докл. Междунар. науч. конф. (г. Москва, 27 мая 2015 г.)*. М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2015. № 4. С. 44–48. EDN: UVKKPD.
3. Lipson H., Kurman M. *Fabricated: the new world of 3D printing*. John Wiley & Sons Limited, 2013. 320 p.
4. Финогеев Д.Ю., Решетникова О.П. Аддитивные технологии в современном производстве деталей точного машиностроения // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2020. № 3. С. 63–71. EDN: QHXXJP.
5. Эртесян А.Р. Обзор технологий 3D-печати в стоматологии // *Медико-фармацевтический журнал «Пульс»*. 2020. № 3. С. 15–18. <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-10-15-18>. EDN: NGOLGM.
6. Essid O., Laga H., Samir C. Automatic detection and classification of manufacturing defects in metal boxes using deep neural networks // *PLoS ONE*. 2018. Vol. 13. Iss. 11. P. e0203192. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203192>.
7. Strokina N., Mankki A., Eerola T., Lensu L., Käyhkö J., Kälviäinen H. Framework for developing image-based dirt particle classifiers for dry pulp sheets // *Machine Vision and Applications*. 2013. Vol. 24. Iss. 4. P. 869–881. <https://doi.org/10.1007/s00138-013-0485-1>.
8. Раевский Е.В., Цыганкова А.А. Технология лазерного спекания металла вышла на новый уровень промышленного применения // *Аддитивные технологии*. 2016. № 1. С. 13–15.
9. Тагер А.А. *Физико-химия полимеров* / под ред. А.А. Аскадского. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Научный мир, 2007. 573 с.
10. Рихарев М.И. Цифровая аддитивная линейка // *Аддитивные технологии*. 2020. № 3. С. 18–26.
11. Абакумов Г.А., Менсов С.Н., Семенов А.В., Чесноков С.А. Особенности возникновения и развития надмолекулярной структуры в полимерах при фотополимеризации // *Высокомолекулярные соединения. Сер. Б*. 2000. Т. 42. № 7. С. 1252–1256.
12. Шурыгина М.П., Чесноков С.А., Лопатин М.А., Черкасов В.К., Абакумов Г.А. Кинетика фотовосстановления 9,10-фенантренина в присутствии аминов и полиметилбензолов // *Известия Академии наук. Серия химическая*. 2004. Т. 53. № 11. С. 2381–2385.
13. Crivello J.V., Reichmanis E. *Photopolymer materials and processes for advanced technologies* // *Chemistry of Materials*. 2014. Vol. 26. Iss. 1. P. 533–548. <https://doi.org/10.1021/cm402262g>.
14. Odian G. *Principles of polymerization*. New York: John Wiley & Sons, 2004. Ch. 3. 788 p.
15. Юдина Н.А., Манюк О.Н. Актуальные вопросы фотополимеризации и прямого композитного восстановления твердых тканей зубов // *Медицинские новости*. 2022. № 9. С. 54–58. EDN: UOTWSI.
16. Биллингхэм Р.Н., Ледвис А., Теддер Дж. Реакционная способность, механизмы реакций и структура в химии полимеров / пер. с англ. М.: Мир, 1977. 79 с.
17. Думчев И.С., Ларченко А.Г., Попов С.И., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В. Восстановление полиамидных сепараторов подшипников буксового узла подвижного состава ОАО РЖД // *Молодой ученый*. 2012. № 12. С. 48–51. EDN: RFYKFD.
18. Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г., Ларченко А.Г., Филатова С.Н. Высокочастотная электротермическая обработка неметаллического вторичного сырья // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2014. № 6. С. 55–65. <https://doi.org/10.7463/0614.0712029>. EDN: STAQZL.
19. Delli U., Chang Shing. Automated process monitoring in 3D printing using supervised machine learning // *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 26. P. 865–870. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.111>.
20. Бычковский Д.Н., Неткачев А.Г. Производство литейных форм методом послойной печати // *Аддитивные технологии*. 2018. № 4. С. 16–20.

References

1. Vyavahare S., Teraiya S., Panghal D., Kumar S. Fused deposition modelling: a review. *Rapid Prototyping Journal*. 2020;26(1):176-201. <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2019-0106>.

2. Kamaev S.V., Markov M.A., Nikitin A.N., Novikov M.M. Laser stereolithography: state and prospects. In: *Additivnye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee: sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii = Additive technologies: present and future: collected reports of the International scientific conference*. 27 May 2015, Moscow. Moscow: The national research center "Kurchatov institute"; 2015, Iss. 4, p. 44-48. (In Russ.). EDN: UVKKPD.
3. Lipson H., Kurman M. *Fabricated: the new world of 3D printing*. John Wiley & Sons Limited; 2013, 320 p.
4. Finogeev D.Yu., Reshetnikova O.P. Additive technologies in modern production of precision machine building parts. *Vestnik of Saratov State Technical University*. 2020;3:63-71. (In Russ.). EDN: QHXXJP.
5. Ertesyan A.R. Overview of 3D Printing technologies in dentistry. *Medico-pharmaceutical journal "PULSE"*. 2020;3:15-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-10-15-18>. EDN: NGOLGM.
6. Essid O., Laga H., Samir C. Automatic detection and classification of manufacturing defects in metal boxes using deep neural networks. *PLoS ONE*. 2018;13(11):e0203192. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203192>.
7. Strokina N., Mankki A., Eerola T., Lensu L., Käyhkö J., Kälviäinen H. Framework for developing image-based dirt particle classifiers for dry pulp sheets. *Machine Vision and Applications*. 2013;24(4):869-881. <https://doi.org/10.1007/s00138-013-0485-1>.
8. Raevskij E.V., Cygankova A.L. The technology of metal laser sintering has moved to a new level of industrial application. *Additive technologies*. 2016;1:13-15. (In Russ.).
9. Tager A.A. *Physical chemistry of polymers*. Moscow: Nauchnyj mir; 2007, 573 p. (In Russ.).
10. Rikharev M.I. Digital additive ruler. *Additive technologies*. 2020;3:18-26. (In Russ.).
11. Abakumov G.A., Mensov S.N., Semenov A.B., Chesnokov S.A. Development of evolution of supramolecular structure in polymers under photopolymerization. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Ser. B*. 2000;42(7):1252-1256. (In Russ.).
12. Shurygina M.P., Chesnokov S.A., Lopatin M.A., Cherkasov V.K., Abakumov G.A. Kinetics of photoreduction of 9,10 phenanthrenequinone in the presence of amines and polymethylbenzenes. *Russian Chemical Bulletin*. 2004;53(11):2381-2385. (In Russ.).
13. Crivello J.V., Reichmanis E. Photopolymer materials and processes for advanced technologies. *Chemistry of Materials*. 2014;26(1):533-548. <https://doi.org/10.1021/cm402262g>.
14. Odian G. *Principles of polymerization*. New York: John Wiley & Sons; 2004, Ch. 3, 788 p.
15. Yudina N.A., Manyuk O.N. Actual problems of light curing and direct composite restoration of the teeth. *Medicinskie novosti*. 2022;9:54-58. (In Russ.). EDN: UOTWSI.
16. Billingham R.N., Ledvis A., Tedder G. *Reactivity, mechanism and structure in polymer chemistry*, 1977, 79 p. (Russ. ed.: *Reakcionnaya sposobnost', mekhanizmy reakcij i struktura v himii polimerov*. Moscow: Mir; 1977, 79 p.)
17. Dumchev I.S., Larchenko A.G., Popov S.I., Filippenko N.G., Livshic A V. Restoration of polyamide bearing cages for the axle box unit of the rolling stock of JSC Russian Railways. *Molodoj uchenyj*. 2012;12:48-51. (In Russ.). EDN: RFYKFD.
18. Livshitz A.V., Filippenko N.G., Larchenko A.G., Filatova S.N. High-frequency electro-thermal processing of secondary nonmetallic raw materials. *The Education and Science Journal*. 2014;6:55-65. <https://doi.org/10.7463/0614.0712029>. EDN: STAQZL. (In Russ.).
19. Delli U., Chang Shing. Automated process monitoring in 3D printing using supervised machine learning. *Procedia Manufacturing*. 2018;26:865-870. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.111>.
20. Bychkovskij D.N., Netkachev A.G. Production of molds by layer-by-layer printing. *Additive technologies*. 2018;4:16-20. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Филиппенко Николай Григорьевич,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры «Автоматизация
производственных процессов»,
Иркутский государственный университет путей
сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия
✉ ifpi@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7557-7774>

Каргапольцев Сергей Константинович,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры технологии и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
kck6262@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4601-3099>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolay G. Filippenko,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Production Process Automation,
Irkutsk State Transport University,
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia
✉ ifpi@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7557-7774>

Sergey K. Kargapol'tsev,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Technology and
Equipment of Mechanical Engineering Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
kck6262@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4601-3099>

Чумбадзе Тамара Темуриевна,
аспирант,
Иркутский государственный университет путей
сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия
ifpi@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1160-5756>

Tamara T. Chumbadze,
Postgraduate Student,
Irkutsk State Transport University,
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia
ifpi@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1160-5756>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 08.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 03.05.2024 г.; принята к публикации 12.05.2024 г.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 08.04.2024; approved after reviewing 03.05.2024; accepted for publication 12.05.2024.