

## ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ И МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 539.4.014.13

DOI: 10.18324/2077-5415-2025-4-7-13

## Управление технологическим процессом послойного отверждения фотополимеров при аддитивном производстве

Н.Г. Филиппенко<sup>1а</sup>, Т.Т. Чумбадзе<sup>1б</sup>, С.К. Каргапольцев<sup>2с</sup><sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия<sup>2</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия<sup>а</sup> ifpi@mail.ru, <sup>б</sup> tamriko98@yandex.ru, <sup>с</sup> kck6262@mail.ru<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7557-7774>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1009-4616>,<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4601-3099>

Статья поступила 02.09.2025, принята 21.11.2025

*В современных условиях при изготовлении изделий из фотополимерных материалов методом аддитивных технологий используются различные способы управления процессом. При этом ключевым вопросом остаётся выбор подходящей системы управления непосредственно процесса отверждения. Данная проблема обусловлена высокими требованиями к точности выполнения изделий и значительным (до 18 %) браком при производстве изделий. Проблема состоит ещё и в том, что с целью нивелирования данных недостатков в процессе изготовления вынужденно производятся дополнительные операции в специальных установках (камерах) для проведения постзасветок, время которых определяется экспериментально. Всё это требует дополнительных материальных и временных затрат. Рассмотрев физические процессы, происходящие при полимеризации, авторами были определены некоторые их особенности, анализ которых позволил выбрать в качестве контролируемого параметра температурный отклик фотокомпозиции в процессе её активации УФ-излучением. Этот параметр оказывает прямое влияние на идентификацию процессов начала и окончания полимеризации, что напрямую влияет на степень полимеризации и способность изделия выдерживать расчётные нагрузки. Усовершенствованная технология, предлагаемая авторами в данной работе, позволяет повысить прочностные характеристики изделий из полимерных композитных материалов более чем на 10 %. Предлагаемый оригинальный алгоритм работы системы управления процессом исследования и технологическим процессом фотополлимеризации позволил авторам обосновать применение данной технологии изготовления, как упрочняющую, за счёт контролируемого увеличения твёрдости готового изделия. Апробация разработанной авторами технологии позволила изготовить образцы изделий, увеличив их твёрдость на 12,3 %.*

**Ключевые слова:** усовершенствованная аддитивная технология; фотополимер; температурный отклик полимера; контролируемый параметр процесса.

## Control of the technological process of layer-by-layer curing of photopolymers in additive manufacturing

N.G. Filippenko<sup>1а</sup>, T.T. Chumbadze<sup>1б</sup>, S.K. Kargapoltsev<sup>2с</sup><sup>1</sup> Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia<sup>2</sup> Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia<sup>а</sup> ifpi@mail.ru, <sup>б</sup> tamriko98@yandex.ru, <sup>с</sup> kck6262@mail.ru<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7557-7774>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1009-4616>,<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4601-3099>

Received 02.09.2025, accepted 21.11.2025

*In modern practice, the fabrication of products from photopolymer materials using additive manufacturing technologies involves various methods of process control. A key challenge remains the selection of an appropriate control system for the polymerization stage itself. This issue arises from the stringent accuracy requirements for manufactured parts and the relatively high defect rate, which can reach up to 18%. To mitigate these drawbacks, additional processing steps – such as post-curing in specialized chambers – are commonly introduced. However, the duration of such post-processing is often determined empirically, leading to increased time and material costs. By analyzing the physical processes occurring during polymerization, specific features are identified that enabled them to select the temperature response of the photopolymer composite under UV exposure as a critical control parameter. This thermal response directly reflects the initiation and completion phases of the polymerization process, which in turn determines the degree of curing and the mechanical load-bearing capacity of the final product. The improved process proposed in this work enables an increase in the mechanical strength of composite polymer parts by more than 10 %. The original control algorithm developed by the authors governs both the research process and the technological sequence of photopolymerization. It substantiates the effectiveness of the proposed approach as a strengthening method by ensuring a controlled increase in the final product's hardness. Experimental validation of the developed method has demonstrated an increase in hardness of manufactured samples by 12,3 %.*

**Keywords:** enhanced additive manufacturing technology; photopolymer; thermal response of the polymer; controlled process parameter.

**Введение.** Фотополимерные материалы, благодаря своей уникальной способности к полимеризации под действием света, нашли широкое применение в различных отраслях науки, техники и промышленности (рис. 1). Их ключевые преимущества – высокая точность формования, возможность создания изделий сложной геометрии, обладающих антимагнитными и антикоррозионными свойствами. Широкий диапазон физико-механических свойств фотополимеров при добавлении различных композитов делает их незаменимыми в современных машиностроительных технологиях [1–4].

Свойство оптической прозрачности и современные технологии использования фотополимеров позволяют создавать различные муфты и разветвители для оптоволоконных линий передачи информации. Применение мобильных устройств ультрафиолетовой засветки даёт

возможность обрабатывать любые поверхности непосредственно по месту узла или агрегата [5, 6].

Последние десятилетия фотополимер нашел широкое применение в машиностроении и сборочных операциях при создании неразъёмных соединений. Так, например, ни один из современных электронных узлов, нуждающихся в герметизации корпуса при сборке, не обходится без использования фотополимера [6, 7].

Дальнейшее развитие области применения изделий из фотополимеров связано с созданием новых композиций на их основе, улучшением их совместимости с другими конструкционными материалами, а расширение возможностей аддитивных технологий является наиболее актуальной и перспективной задачей современности [8–11].



Рис. 1. Область применения фотополимерных материалов

Описание процесса оборудования для создания изделия (рис. 2), систем контроля и управления технологическими процессами SLA-, DLP-, LCD-производств [12–14]

можно укрупнённо представить в виде следующей структурной схемы (рис. 3).

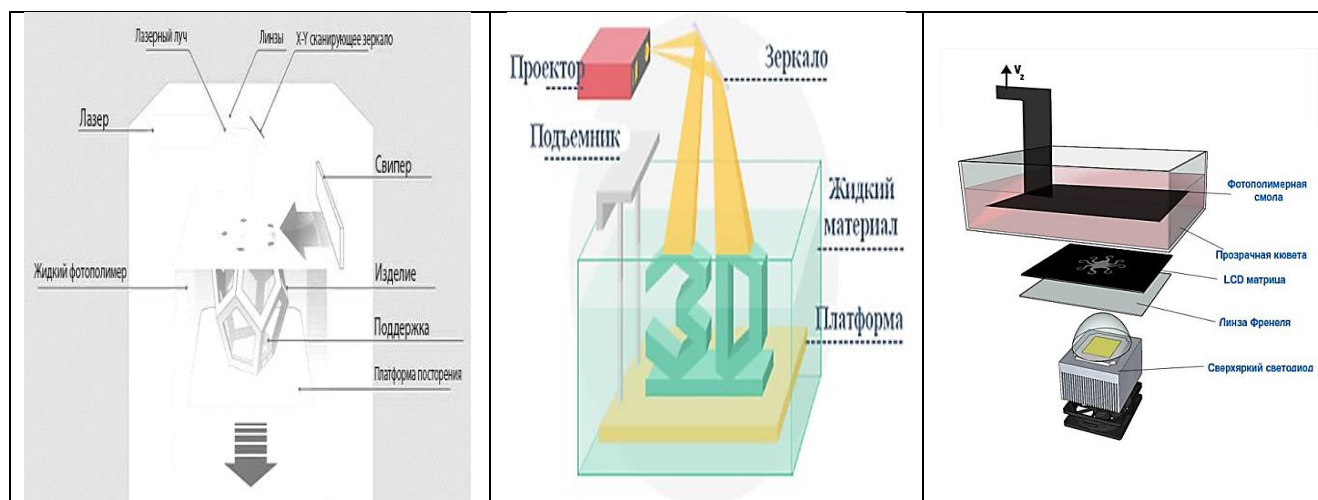
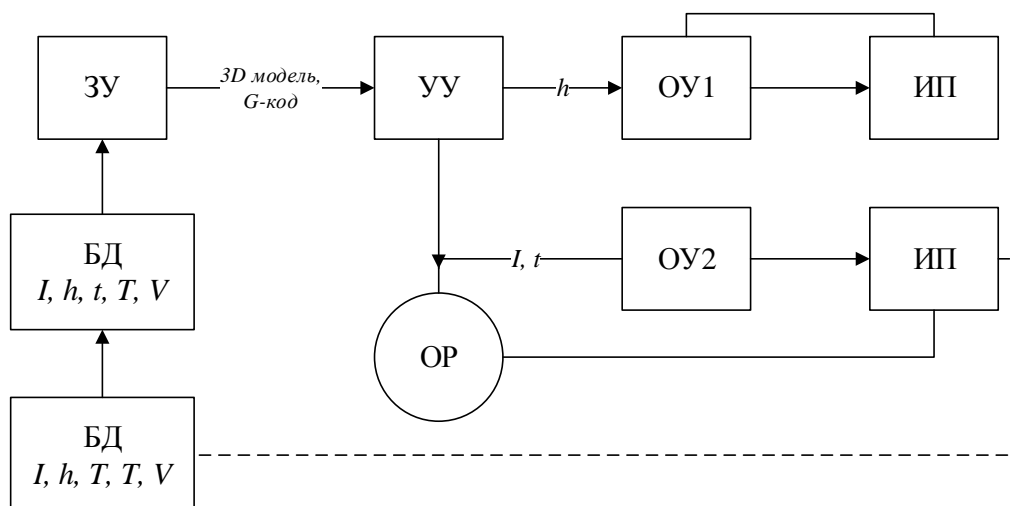


Рис. 2. Процесс и оборудование создания изделия на SLA-, DPL-, LCD-принтере

Рассматриваемая система создана на основе принципа совместной работы автоматического и ручного управления. Работающий оператор, обозначенный на рисунке, как ОП, выбрав из предварительно созданной на основе экспериментальных данных базы шаблонов

БД, типовое изделие, устанавливает режимы его обработки в виде интенсивности излучения, высоты изделия, времени засветки каждого слоя, общего времени обработки, объёма фотополимера  $I$ ,  $h$ ,  $t$ ,  $T$ ,  $V$ , соответственно.



**Рис. 3.** Структурная схема системы управления процессами аддитивных технологий SLA-, DLP-, LCD-принтеров, где: 3У – задающее устройство; УУ – управляющее устройство; ОУ – объект управления; ОУ – объект управления; ИП – измерительный прибор; БД – база шаблонов; ОП – объект управления (оператор)

Анализ систем управления процессами аддитивных технологий (рис. 3) показывает, что все процессы происходят автономно в соответствии с заданной программой, что не вызывает необходимости участия оператора [15]. Тем не менее, несложно не заметить, что ни одна из технологий не обеспечивает контроль процесса самой фотополимеризации и, следовательно, не позволяет отслеживать online качественную характеристику физико-механических свойств изделий. Изделия при такой технологии окончательно не затвердевают, что требует введения дополнительной операции по постзасветке, а процент брака готовых изделий при такой технологии доходит до 18 % [16–18].

Таким образом, целью работы было совершенствование технологии аддитивного производства изделий из фотополимерных материалов за счёт нахождения научно-обоснованных контролируемых параметров процесса фотополимеризации и разработки алгоритма их использования.

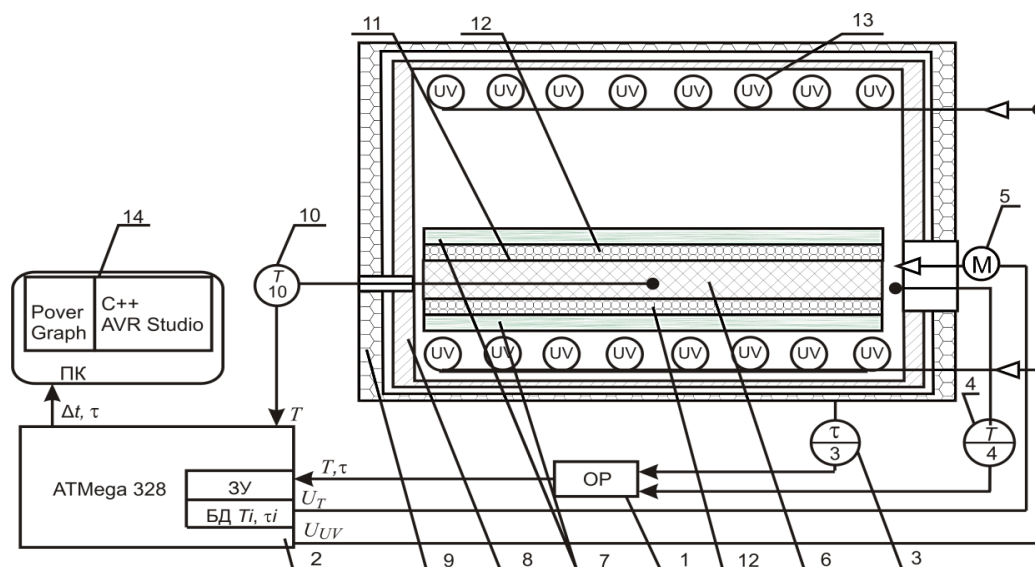
**Разработка аппаратно-программного модуля проведения экспериментальных исследований.** Рас-

смотренные выше физико-химические процессы, происходящие при послойной полимеризации, позволили выдвинуть гипотезу о том, что контроль технологического процесса изготовления изделий из фотополимеров можно осуществлять по динамике температурного отклика фотополимера в процессе его активации.

Выбрав в качестве экспонирующего оборудования промышленную установку AZ3000N3 и фотополимерную композицию отечественного производства марки Nivis (рис. 4), было определено, что исследования необходимо проводить методом автоматизированного эксперимента. Для автоматизированного проведения эксперимента по изучению процесса фотополимеризации был разработан модуль (рис. 5), состоящий из аппаратной и программной части [17–19], что позволяет производить регистрацию, визуализацию, обработку и анализ информации взаимовлияния теплофизических параметров фотополимера и элементов технологической системы [19, 20]. Структурная схема автоматизированной системы проведения экспериментальных исследований представлена на рис. 5.



**Рис. 4.** Промышленная установка AZ3000N3

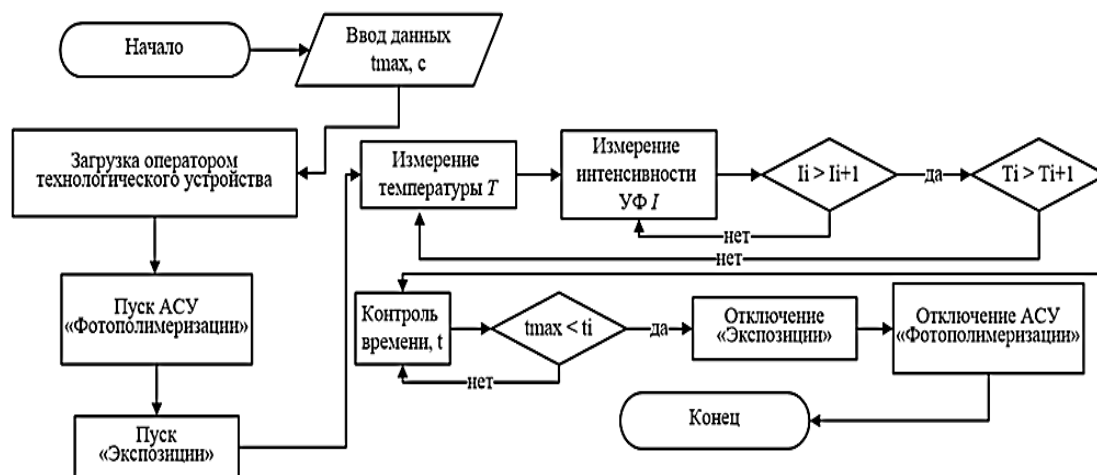


**Рис. 5.** Структурная схема автоматизированной системы проведения экспериментальных исследований на промышленном оборудовании марки AZ3000N3, где: 1 – оператор установки; 2 – программируемый контроллер; 3 – таймер времени полимеризации; 4 – внешний датчик температуры; 5 – мотор вентилятора; 6 – фотополимерный образец; 7 – прижимные стекла; 8, 9 – крышки камеры; 10 – датчик температуры полимера; 11 – плёнка субстрат; 12 – защитная плёнка; 13 – УФ-излучатели; 14 – компьютерно-программный комплекс

Общий принцип работы данной схемы сводится к следующему. Фотополимерный образец 6 помещается на нижнее прижимное стекло 7, которое покрыто защитной пленкой 12. В фотополимерный образец 6 помещается датчик температуры полимера 10, сверху укладывается плёнка субстрат 15 и прижимается верхним стеклом 7. Через оператора установки 1 задаются данные (таймер времени полимеризации 3), далее программный контроллер 2 подключается к компьютерно-программному комплексу 14. Закрывается крышка камеры 9, подключаются УФ-излучатели 13. Температуру в полимерном материале при непрерывном воздействии УФ-излучением контролируют датчиком температуры полимера 10. В процессе полимеризации УФ-излучатели 13 преобразуют часть энергии в тепло, также в фотополимерном образце 6 в процессе фотохимической реакции происходит тепловыделение, что приводит к повышению

температуры внутри камеры, которая может достигать свыше 50 °С, поэтому контроль температуры камеры в процессе полимеризации осуществляется внешним датчиком температуры 4. Для устранения перегрева и стабилизации внешней температуры в камере используется мотор вентилятора 5, который позволяет поддерживать температуру до 30 °С, что соответствует техническим характеристикам фотополимерной смолы Nivis.

Хотелось бы отметить, что алгоритм управления процессом исследования фотополимеризации (рис. 6) разрабатывался таким образом, чтобы он был применим и для промышленного использования, а имеющиеся возможности контроля параметров излучения и температуры могут быть использованы для отладки системы управления применительно к конкретному оборудованию. Методика разработки алгоритма такого типа была подробно представлена авторами в работе [21].



**Рис. 6.** Алгоритм автоматизированного и промышленного управления процессом исследования температурного отклика полимера

**Температурный отклик фотополимера при послойной ультрафиолетовой активации: экспериментальные наблюдения.** Экспериментальные исследования полимеризации фотополимерной композиции производились на образцах из фотополимера глубиной 1, 3, 6 мм, а также фотополимеров с добавлением полиакрилата 1 %. Время засветки менялось с периодичностью в 20 с. Засветка УФ-лампами осуществлялась как поочередно, сверху и снизу, так и одновременно.

В рамках исследования проведён температурный анализ фотополимера в процессе его последовательной ультрафиолетовой засветки с двух противоположных сто-

рон. Температурные измерения выполнялись в центральной зоне образца с целью выявления особенностей теплового режима на различных стадиях полимеризации.

Полученные данные показывают полную корреляцию изменения температурного отклика полимерной композиции в зависимости от этапов технологического процесса аддитивного изготовления. В подтверждение сказанного ниже представлены результаты температурной зависимости наиболее сложного технологического процесса засветки полимера одновременно сверху и снизу, когда на полимер и его нагрев воздействуют два источника УФ-излучения (рис. 7).

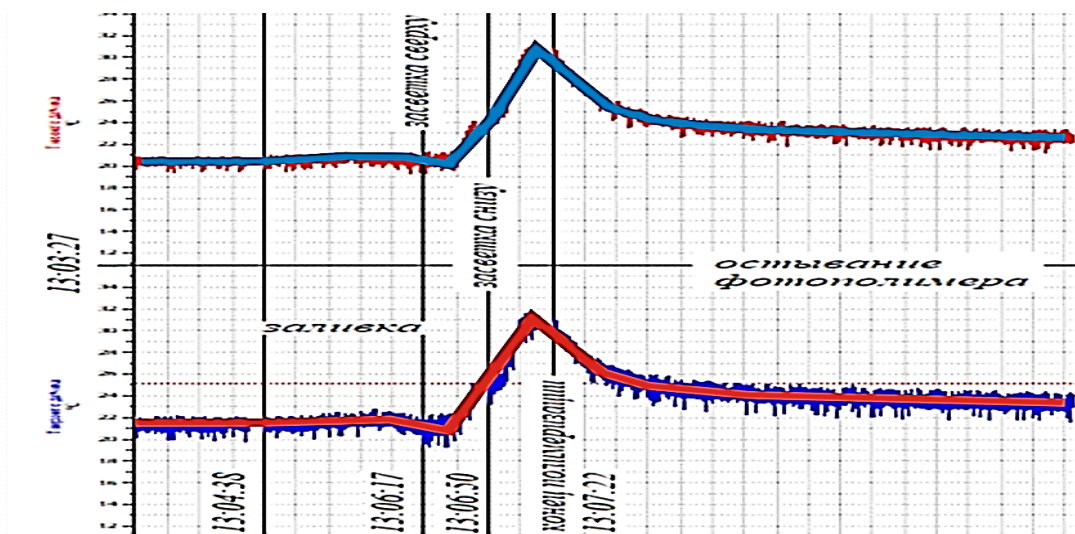


Рис. 7. Одновременная засветка сверху и снизу фотополимерного материала

На рис. 7 приведён полученный график температурной зависимости, отражающей изменение температуры в центре полимерной массы в течение всего технологического цикла, включающего заливку, засветку (активацию) нижним и верхним источниками УФ-излучения, а также последующее охлаждение.

После начала заливки (13:03:27–13:04:38) зафиксировано кратковременное понижение температуры в измерительной точке, что объясняется разностью температур между заливаемым фотополимером и окружающей средой (в том числе стенками формы). Это указывает на наличие начального теплового градиента, влияющего на протекание последующей реакции.

По завершении заливки температура стабилизируется (13:04:38–13:06:17), образуя условно изотермический участок. Этот интервал можно рассматривать как базовую температурную платформу перед началом иницирования фотохимической реакции.

С момента включения нижнего УФ-источника (с 13:06:17) регистрируется постепенное повышение температуры, сопровождаемое предварительным локальным спадом. Последний, вероятно, обусловлен комплексом факторов: светопоглощением в нижних слоях, перераспределением теплового потока и начальным эндотермическим вкладом молекулярной перестройки. Далее температура возрастает до  $\sim 28^{\circ}\text{C}$ , что отражает экзотермический характер фотополимеризации.

Включение второго (с 13:06:50) источника приводит к резкому усилению теплового отклика в центре материала. Максимальная температура достигает  $\sim 32^{\circ}\text{C}$  (к 13:07:22), что связано с наложением тепловых фронтов и завершением отверждения в объёме. Данный пик характеризует основную фазу полимеризационного процесса.

После завершения засветки (после 13:07:22) температура снижается. Скорость охлаждения определяется теплопроводностью материала, конфигурацией формы и теплоотводящими условиями. Анализ данного участка позволяет оценить условия термического релаксационного перехода и формирование остаточных напряжений.

Таким образом, температурный профиль чётко разделяется на пять фаз, каждая из которых характеризуется специфической тепловой динамикой. Наблюдаемые спады температуры на этапах заливки и начала засветки могут быть использованы в процессе управления технологическим процессом, но требуют дополнительного моделирования с привлечением данных по теплоёмкости, кинетике поглощения и распределению светового потока.

Контроль экстремума температуры в процессе засветки идентифицирует окончание полной полимеризации и после его завершения может быть использован как один из оптимумов технологического режима УФ-засветки в аддитивных технологиях.



Полученные результаты полностью подтвердили выдвинутую гипотезу о возможности построения технологического процесса фотополимеризации с использованием контроля температуры в полимерном материале при непрерывном воздействии УФ-излучения.

**Апробация усовершенствованной технологии.** В качестве основного критерия оценки качества изготовленных фотополимерных образцов в данной работе была выбрана их твёрдость, отражающая интегральные характеристики механической прочности материала.

Экспериментальные данные свидетельствуют, что при стандартном подходе, предполагающем управление только временем облучения (экспозиции), без использования дополнительного алгоритмического контроля, значение твёрдости составило 109,12 HL. Такой режим соответствует традиционной реализации аддитивного процесса на большинстве серийных установок (см. рис. 8, кривая 3).

Увеличение времени засветки за пределы рекомендуемых параметров, несмотря на потенциальное повыше-

ние степени отверждения, привело к деградации структуры полимера: наблюдались охрупчивание и признаки начальной деструкции, данные по которым в настоящей работе не приведены.

Альтернативный способ завершения экспонирования – по достижении температурного экстремума (максимума температуры в центре образца) – продемонстрировал улучшение характеристик: твёрдость возросла до 113,29 HL (рис. 8, кривая 2).

Наиболее высокое значение – 117,05 HL – было зафиксировано в случае завершения фотохимического процесса с применением алгоритма управления, включающего фазу переэкспонирования (7 с) и мониторинг термического отклика в реальном времени (рис. 8, кривая 1). Это указывает на эффективность термоконтролируемого подхода в управлении режимами фотополимеризации для повышения эксплуатационных свойств изделий.

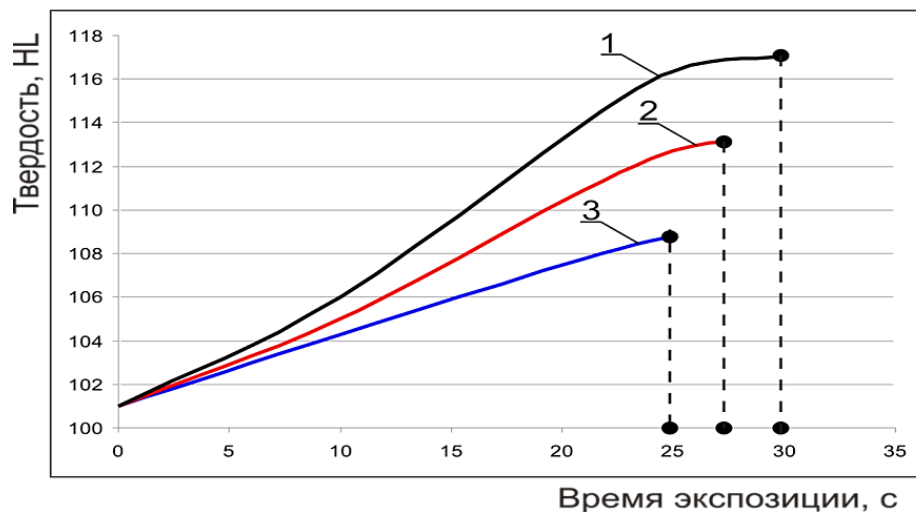


Рис. 8. Изменение твёрдости изделий из полимерного композиционного материала ROEHM R-50

**Заключение.** Проведённые исследования, направленные на реализацию управления аддитивным технологическим процессом фотополимеризации на основе анализа температурных экстремумов в технологической системе, позволили сформулировать следующие выводы:

- подтверждена обоснованность использования температуры в качестве ключевого параметра мониторинга и управления стадиями отверждения фотополимерных композиций;

- предложен и реализован алгоритм активного управления режимами технологического процесса аддитивной фотополимеризации, обеспечивающий автоматизированное завершение процесса по температурному критерию;

- продемонстрированы перспективы повышения механических характеристик получаемых изделий за счёт применения температурно-управляемых режимов, что расширяет функциональные возможности аддитивных технологий при изготовлении ответственных деталей.

#### Литература

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки до 2030 г. // Авиационные материалы и технологии. № 5. 2020. 180 DOI: /10.31857/S0869587320040052
2. Евлашин С., Чернодубов Д. Теплопроводность фотополимера для 3D-печати улучшена в Сколтехе // Polymers, 2023. DOI: 10.1016/j.polymer.2023.126123
3. Dudek P. FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements // Archives of Metallurgy and Materials 2013. 58 (4). P. 1415–1418.
4. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии - доминанта национальной технологической инициативы // Интеллект и технологии. 2015. № 2(11). С. 52–55.
5. Chartier T., Chaput C., Doreau F. Stereolithography of structural complex ceramic parts // Journal of Materials Science, 2002. DOI: 10.1023/A:1016102210277
6. Каблов Е.Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // Металлы Евразии. 2017. № 1. С. 2–6.
7. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D-Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital

- Manufacturing // Springer, 2021. DOI: 10.1007/978-1-4939-2113-3
8. Фторполимерные материалы / отв. ред. академик В.М. Бузник. – Томск : Изд-во ИТЛ, 2017. – 600 с.
9. Wang X., Jiang M., Zhou Z. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective // Composites Part B: Engineering, 2017. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.034
10. Ligon S.C., Liska R., Stampf J. "Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing" // Chemical Reviews, 2017. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00074
11. Официальный веб-сайт Белого дома [Электронный ресурс]: URL: [s://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/05/06/fact-sheet-biden-administration-celebrates-launch-of-am-forward-and-calls-on-congress-to-pass-bipartisan-innovation-act/](https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/05/06/fact-sheet-biden-administration-celebrates-launch-of-am-forward-and-calls-on-congress-to-pass-bipartisan-innovation-act/) (дата обращения: 10.01.2025).
12. Hagy H.E., Shirkey W.D. Determining absolute thermal expansion of titaniasilica glasses: a refined ultrasonic method. // Applied Optics. Vol.14 (9): P. 2099–2103. DOI:10.1364/AO.14.002099. PMID 20154969.
13. Tipler P.A., Mosca G. Physics for Scientists and Engineers - Volume 1 Mechanics/Oscillations and Waves // Thermodynamics. N.Y.: Worth Publishers. P. 666–670.
14. Bullis W. Murray R.B., Hunt, L.P. Handbook of semiconductor silicon technology. // Park Ridge, New Jersey: Noyes Publications. P. 431–452.
15. Harz L. Проблемы фотополимерной печати [Электронный ресурс]: URL: <https://3dtoday.ru/blogs/harz-labs/samye-rasprostranennye-problemy-fotopolimernoi-pecati-po-versii-harz-labs> (дата обращения: 10.01.2025).
16. Фалина О.В. Первые отечественные промышленные SLS 3D принтеры // Аддитивные технологии. 2022. № 2. С. 77–106.
17. Буторин Д.В. Филиппенко Н.Г., Филатова С.Н., Лившиц А.В., Каргапольцев С.К. Автоматизация контроля структурных превращений в полимерных материалах при электротермической обработке // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 1 (49). С. 117–125.
18. Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Чумбадзе Т.Т., Буторин Д.В. Программный модуль автоматизированной системы управления технологическим процессом контроля фотополимеризации ver. 1.0 // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, номер свидетельства: RU 2024611450 Патентное ведомство: Россия, год публикации: 2024, номер заявки: 202461003, дата регистрации: 09.01.2024, дата публикации: 22.01.2024.
19. Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Буторин Д.В., Чумбадзе Т.Т. Автоматизированное управление процессом фотополимеризации // Автоматизация. Современные технологии 2024. №3 (78). С. 99–104 DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-3-99-104.
20. Буторин Д.В., Филиппенко Н.Г., Филатова С.Н., Лившиц А.В., Каргапольцев С.К. Разработка методики определения структурных превращений в полимерных материалах Современные технологии. Системный анализ. Моделирование 2015. № 4 (48). С. 80–86.
21. Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Машович А.Я. Автоматизация процесса высокочастотного нагрева материалов на промышленной установке УЗП 2500 адаптивным методом. Использование автоматизированной установки в лабораторных целях Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 2 (30). С. 193–198.
3. Dudek P. FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements // Archives of Metallurgy and Materials 2013. 58 (4). P. 1415–1418.
4. Kablov E.N. Additive technologies - the dominant feature of the national technological initiative // Intelligence and technologies. 2015. No. 2 (11). P. 52–55.
5. Chartier T., Chaput C., Doreau F. Stereolithography of structural complex ceramic parts // Journal of Materials Science, 2002. DOI: 10.1023/A:1016102210277
6. Kablov E.N. The present and future of additive technologies // Metals of Eurasia. 2017. No. 1. P. 2–6.
7. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing // Springer, 2021. DOI: 10.1007/978-1-4939-2113-3
8. Fluoropolymer materials / ed. ed. academician V.M. Buznik. - Tomsk: NTL Publishing House, 2017. 600 p.
9. Wang X., Jiang M., Zhou Z. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective // Composites Part B: Engineering, 2017. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.034
10. Ligon S.C., Liska R., Stampf J. "Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing" // Chemical Reviews, 2017. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00074
11. Official website of the White House [Electronic resource]: URL: [s://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/05/06/fact-sheet-biden-administration-celebrates-launch-of-am-forward-and-calls-on-congress-to-pass-bipartisan-innovation-act/](https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/05/06/fact-sheet-biden-administration-celebrates-launch-of-am-forward-and-calls-on-congress-to-pass-bipartisan-innovation-act/) (accessed 01/10/2025).
12. Hagy H.E., Shirkey W.D. Determining absolute thermal expansion of titaniasilica glasses: a refined ultrasonic method. // Applied Optics. Vol.14(9): P. 2099–2103. DOI:10.1364/AO.14.002099. PMID 20154969.
13. Tipler P.A., Mosca G. Physics for Scientists and Engineers - Volume 1 Mechanics/Oscillations and Waves // Thermodynamics. N.Y.: Worth Publishers. P. 666–670.
14. Bullis W. Murray R.B., Hunt, L.P. Handbook of semiconductor silicon technology. // Park Ridge, New Jersey : Noyes Publications. P. 431–452.
15. Harz L. Problems of photopolymer printing [Electronic resource]: URL: <https://3dtoday.ru/blogs/harz-labs/samye-rasprostranennye-problemy-fotopolimernoi-pecati-po-versii-harz-labs> (accessed: 10.01.2025).
16. Falina O.V. The first domestic industrial SLS 3D printers // Additive technologies. 2022. No. 2. M. P. 77–106.
17. Butorin D.V. Filippenko N.G., Filatova S.N., Livshits A.V., Kargapoltsev S.K. Automation of control of structural transformations in polymeric materials during electrothermal processing // Modern technologies. Systems analysis. Modeling. 2016. No. 1 (49). P. 117–125.
18. Filippenko N.G., Livshits A.V., Chumbadze T.T., Butorin D.V. Software module of the automated process control system for photopolymerization control ver. 1.0 // Certificate of state registration of a computer program, certificate number: RU 2024611450 Patent Office: Russia, year of publication: 2024, application number: 202461003, registration date: 01/09/2024, publication date: 01/22/2024
19. Filippenko N.G., Livshits A.V., Butorin D.V., Chumbadze T.T. Automated control of the photo-polymerization process // Automation. Modern technologies 2024 №3(78) P.99-104 DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-3-99-104
20. Butorin D.V., Filippenko N.G., Filatova S.N., Livshits A.V., Kargapoltsev S.K. Development of a methodology for determining structural transformations in polymeric materials Modern technologies. Systems analysis. Modeling 2015. № 4 (48). P. 80–86.
21. Filippenko N.G., Livshits A.V., Mashovich A.Ya. Automation of the process of high-frequency heating of materials on an industrial installation UZP 2500 by an adaptive method. Use of an automated installation for laboratory purposes Modern technologies. Systems analysis. Modeling. 2011. No. 2 (30). P. 193–198.

#### References