

ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОСТИ 3D-ПЕЧАТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

М.В. Турченко,
Ю.А. Гончарова

turchenko.maksim.v@mail.ru
lopatina.julia@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Данная работа посвящена исследованию твердости 3D-печатных изделий, изготовленных по технологии FDM (Fusion Deposition Modeling — моделирование методом послойного наплавления) после проведения термической обработки при различной температуре. Экспериментальные образцы изготавливали из пластика PLA (polylactide — полилактид). Твердость измеряли с помощью стационарного твердомера методом Шора по шкале D. В результате обработки экспериментальных данных получена зависимость изменения твердости 3D-печатных образцов от температуры нагрева. На основе полученных данных сделаны выводы о перспективе проведения термической обработки 3D-печатных изделий по технологии FDM и предложены действия для повышения эффективности проведения термической обработки с целью увеличения механических свойств.

Ключевые слова

Аддитивные технологии, 3D-печать, полимерные материалы, термическая обработка, измерение твердости, послойное наплавление, полилактид, модификация изделий

Поступила в редакцию 21.04.2022

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022

Введение. Современные темпы развития промышленности требуют применения новых инновационных технологий [1]. К данным технологиям можно отнести аддитивное производство, которое, в свою очередь, включает в себя большой спектр технологий изготовления деталей: FDM (Fusion Deposition Modeling — моделирование методом послойного наплавления), SLA (Laser Stereolithography — лазерная стереолитография), SLS (Selective Laser Sintering — селективное лазерное сплавление), DOD (Drop on Demand — распыление материала методом струйной печати), Binder Jetting — струйная печать, SLM (Selective Laser Melting — селективное лазерное сплавление) (рис. 1).

На сегодняшний день непросто найти отрасль производства, где не применяются аддитивные технологии [3]. Их использование позволяет получать изделия любой сложности без выполнения большого количества технологических операций. Изделия, полученные с помощью аддитивных технологий, не уступают по свойствам изделиям, изготовленным традиционными методами. В настоящий момент одной из самых востребованных технологий является FDM-технология. Она представляет собой послойное нанесение выдавленного материала из экструдера на печатную платформу [4].



Рис. 1. Основные технологии аддитивного производства [2]

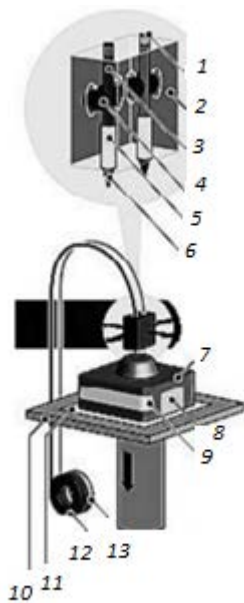


Рис. 2. Пример реализации FDM-технологии [5]:
 1 — нить поддерживаемого материала; 2 — рабочая головка; 3 — нить конструктивного материала; 4 — Направляющие валики; 5 — камеры плавления; 6 — сопла; 7 — модель; 8 — заполнение пустот; 9 — поддерживающий материал; 10 — катушки с поддерживающими материалами; 11 — катушки с конструктивными материалами; 12 — подкладка; 13 — рабочая платформа

К преимуществам данной технологии можно отнести простоту и дешевизну оборудования по сравнению с другими технологиями [6]. Большой спектр используемых материалов также является одним из основных преимуществ. Помимо достоинств у данной технологии имеются и недостатки. К ним относится низкая точность полученных изделий [7]. Кроме того, такие изделия уступают по свойствам изделиям, полученным с помощью других технологий. В данной работе предложено выполнять термическую обработку напечатанных изделий с целью улучшения механических свойств на примере твердости.

Материалы и методики. Поскольку на сегодняшний день нет отработанных процессов проведения термической обработки 3D-печатных полимерных изделий, выбор вида и режима определяется экспериментально. В работе [8] описан процесс отжига полимерных изделий из ABS- и PLA-пластика. На основании данной работы для данного исследования выбран PLA-пластик, поскольку он

является кристаллическим полимером, а ABS-пластик — аморфным (для материала данного вида повышение температуры с последующей выдержкой никак не повлияет, поскольку молекулы не будут перестраиваться должным образом). На PLA-пластик перечисленные выше условия должны оказывать существенное влияние.

В качестве образца для проведения термообработки в данной работе выбран параллелепипед высотой 10 мм, шириной 15 мм и длиной 30 мм (рис. 3, а). Образцы изготавливали на 3D-принтере ULTI steel, работающем по FDM-технологии (рис. 3, б).

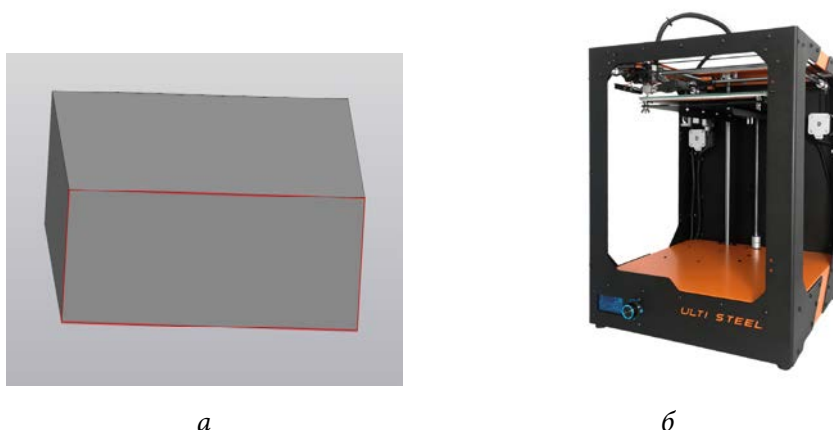


Рис. 3. Модель образца (а) и 3D-принтер для их печати (б)

Заполнение при печати было выбрано на уровне 100 %. При меньшем проценте заполнения внутри образца будут образовываться пустоты различной формы (особенность вида заполнения) [9], что может отразиться на работе твердомера (рис. 4). Скорость печати составляла 60 мм/с. Температура экструдера была равна 190 °С, а температура стола — 70 °С. Данный выбор объясняется особенностью используемого материала (PLA-пластик). Все параметры, описанные выше, вводили вместе с 3D-моделью образца в специальное программное обеспечение, называемое «слайсер». После ввода этих параметров данная программа разделяет модель изделия на слои и формирует для каждого слоя траекторию движения экструдера и платформы, преобразуя их на выходе в управляющую программу для 3D-принтера.

Температура термической обработки напечатанных образцов в процессе эксперимента варьировалась в диапазоне 35...100 °С. Поскольку температура стеклования PLA-пластика составляет примерно 54...58 °С, а при заданной температуре в материале будут происходить различные структурные изменения, которые могут привести к изменению механических свойств. Температура выдержки составляла 10 минут.

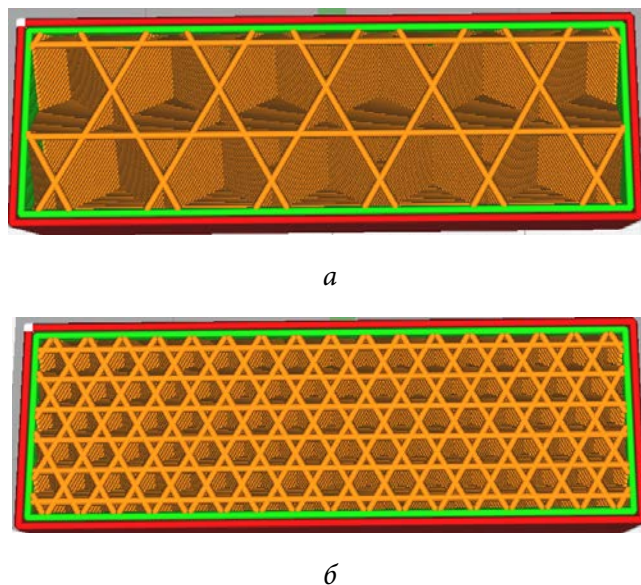


Рис. 4. Размер пустот при различном заполнении образцов:
a — заполнение 33 %; *б* — заполнение 100 %

В качестве оборудования для проведения термообработки использовали электропечь SNOL 60/300 LSN 11 (рис. 5). При укладке образца в электропечь необходимо учитывать, что температура вблизи дверцы меньше, чем со стороны стенок, из-за потери теплоты при открытии дверцы. Из этих соображений рекомендуется располагать образцы ближе к задней стенке, не касаясь нагревателей. После окончания процесса нагрева и выдержки образцы извлекают из печи и оставляют остужаться при комнатной температуре.



Рис. 5. Электропечь SNOL 60/300 LSN 11

После проведения термической обработки измеряли твердость каждого из образцов согласно ГОСТ 24621–2015. В качестве оборудования использовали твердомер, работающий по методу Шора (рис. 6).



Рис. 6. Твердомер, работающий по методу Шора

Результаты и обсуждение. Результаты измерения твердости представлены в таблице. Нумерация образцов осуществлялась согласно температуре термической обработки и порядковому номеру образца в партии, например, номер 35-1 означает, что температура нагрева образца в процессе термообработки составляла 35 °С и что это первый образец в партии.

Результаты измерений

Номер образца	Температура нагрева, °С	Твердость HRD при различных измерениях					Среднее значение твердости
		1 измерение	2 измерение	3 измерение	4 измерение	5 измерение	
35-1	35	77	82	78	78	78	79 ± 1,48
35-2		78	78	79	79	77	
35-3		79	78	82	79	77	
50-1	50	78	77	81	78	79	79 ± 1,34
50-2		81	78	79	79	78	
50-3		78	80	77	78	76	
70-1	70	80	78	81	82	78	80 ± 1,31
70-2		79	79	81	80	80	
70-3		79	80	81	79	81	
100-1	100	80	79	81	80	80	79 ± 1,51
100-2		82	81	81	78	79	
100-3		78	76	78	78	79	

На основании этих данных была получена зависимость изменения твердости от температуры нагрева (рис. 7). По графику можно заметить, что при нагреве от 30 до 50 °С твердость незначительно уменьшалась. При нагреве от 50 до 70 °С наблюдается прирост твердости. Поскольку температура стеклования PLA пластика составляет порядка 60 °С, можно сказать, что при приближении и отдалении от данной температуры на 5...10 °С в материале частично успевают пройти процессы перестроения кристаллов. Прирост твердости в интервале температур от 70 °С и выше не наблюдается по причине того, что материал при этих температурах нагрева переходит в высокоэластичное состояние. Кристаллы не успевают перестроиться или делают это с слишком большой скоростью, что, в свою очередь, приводит к появлению видимых внешних дефектов на образцах.

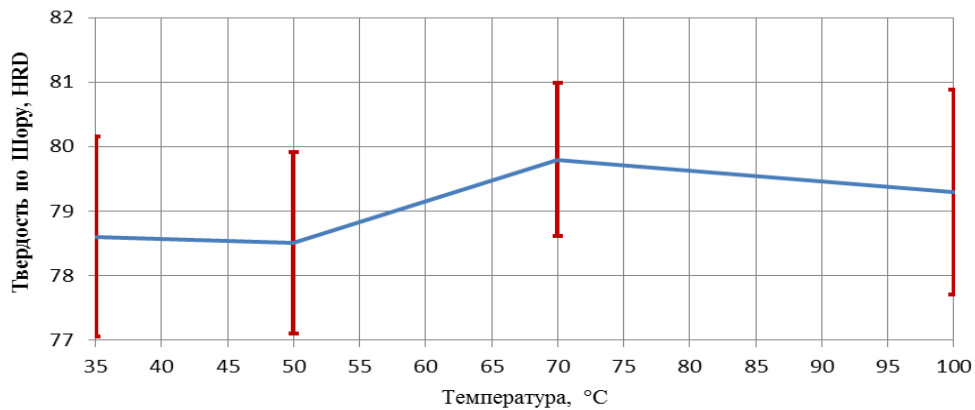


Рис. 7. Зависимость твердости от температуры нагрева

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что для проведения термической обработки при температурах 70 °С и выше с целью прироста твердости необходимо увеличить время выдержки после нагрева. Благодаря этому в материале успевают пройти превращения (перестроение кристаллов), которые обеспечивают необходимый прирост прочности. Однако отметим, что термическая обработка при нагреве от 70 °С и выше сопровождается деформацией образца, что, в свою очередь, говорит о том, что проведение термической обработки для изделий при данных температурах нагрева нецелесообразно (рис. 8).

Таким образом, рекомендуется выполнять термическую обработку изделий из PLA-пластика при температуре нагрева 50...70 °С с последующей длительной выдержкой. Конкретное время выдержки при нагреве до заданной температуры будет выявлено в результате дальнейших исследований.



Рис. 8. Образец после проведения термической обработки с нагревом до 100 °С

Выводы. При проведении термической обработки 3D-печатных изделий из PLA-пластика можно добиться прироста твердости, но в определенном температурном интервале 50...70 °С. Более глубокое исследование данного процесса в перспективе даст возможность улучшения механических свойств напечатанных изделий, что, в свою очередь, расширит возможности применения FDM-технологии для изготовления изделий из полимеров. Данный процесс требует не только долгой и тщательной проработки, но и дополнительных исследований.

Также на основании полученных результатов можно предложить изменить выбранные параметры термической обработки для получения более существенного прироста твердости. Выбранного времени выдержки может быть недостаточно, поскольку молекулы полимера перестраиваются в процессе нагрева и последующего медленного охлаждения весьма медленно. Для увеличения эффективности термической обработки следует нагревать образцы до уже определенной в данном исследовании температуры, но варьировать при этом время выдержки и затем измерять показатель твердости.

Литература

- [1] Гончарова О.Н., Бережной Ю.М., Бессарабов Е.Н. и др. Аддитивные технологии-динамично развивающееся производство. *Инженерный вестник Дона*, 2016, № 4. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3931>
- [2] Волхонский А.Е., Дудков К.В. Методы изготовления прототипов и деталей агрегатов различных изделий промышленности с помощью аддитивных технологий. *Образовательные технологии*, 2014, № 1, с. 127–143.
- [3] Игоница Е.В., Дружинина О.В. Особенности разработки и применения FDM-технологии при создании и прототипировании 3D-объектов. *Современные информационные технологии и ИТ-образование*, 2017, т. 13, № 2, с. 185–193. DOI: <https://doi.org/10.25559/SITITO.2017.2.224>

- [4] Киселева А.Е. Применение аддитивных технологий при решении конструкторских задач в судостроении. *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*, 2017, № 48-49, с. 84–88.
- [5] Дубинкин Д.М., Красавин А.Д., Сорокин В.Ю. Современное состояние FDM-технологий. *Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте*. Кемерово, КузГТУ, 2019, с. 171–173.
- [6] Смирнов М.А., Рыбкин Н.О., Ксенофонтова О.Л. FDM-технология: особенности применения, преимущества, недостатки. В: *Проблемы экономики, финансов и управления производством*. Иваново, ИГХТУ, 2021, № 48, с. 115–122.
- [7] Холодилов А.А., Пузынина М.В. Проблемы, возникающие при трехмерной печати объектов с использованием технологии FDM. *Наука, образование, инновации: апробация результатов исследований*. Нефтекамск, Мир науки, 2017, с. 199–204.
- [8] Чуваев И.А., Габельченко Н.И. Термическая обработка 3d печатных изделий из пластмасс. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2019, № 6-1, с. 70–75. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.84.6.014>
- [9] Балашов А.В., Маркова М.И. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью. *Инженерный вестник Дона*, 2019, № 1. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5618>

Турченко Максим Витальевич — студент кафедры «Материаловедение», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Гончарова Юлия Александровна — ассистент кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий лабораторией инновационных конструкционных полимерных материалов ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Турченко М.В., Гончарова Ю.А. Исследование твердости 3d-печатных изделий после проведения термической обработки. *Политехнический молодежный журнал*, 2022, № 05(70). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-05-796>

INVESTIGATION OF THE HARDNESS OF 3D-PRINTED PRODUCTS AFTER HEAT TREATMENT

M.V. Turchenko
Yu.A. Goncharova

turchenko.maksim.v@mail.ru
lopatina.julia@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

This article describes the hardness of 3D-printed products made by FDM (Fused Deposition Modeling) technology after heat treatment at different temperatures. The experimental samples were made of PLA (polylactide) plastic. The hardness was measured with a stationary Shore hardness tester using the D scale. As a result of processing the experimental data, the dependence of changes in the hardness of 3D-printed images on the heating temperature was determined. Based on the data obtained, conclusions about the prospects of heat treatment of 3D-printed products using FDM technology were made, and actions for increasing the efficiency of heat treatment to increase the mechanical properties were proposed.

Keywords

Additive technologies, 3D printing, polymeric materials, heat treatment, hardness measurement, fused deposition modeling, polylactide, product modification

Received 21.04.2022

© Bauman Moscow State Technical University, 2022

References

- [1] Goncharova O.N., Berezhnoy Yu.M., Bessarabov E.N. et al. Additive technology is a dynamically developing production. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2016, no. 4. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3931> (in Russ.).
- [2] Volkhonskiy A.E., Dudkov K.V. Methods for prototypes and parts production of different industrial products aggregates using additive technologies. *Obrazovatel'nye tekhnologii*, 2014, no. 1, pp. 127–143 (in Russ.).
- [3] Igonina E.V., Druzhinina O.V. Particular qualities of the development and application of fdm-technology for creating and prototyping 3D-objects. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie* [Modern Information Technologies and IT-Education], 2017, vol. 13, no. 2, pp. 185–193. DOI: <https://doi.org/10.25559/SITITO.2017.2.224> (in Russ.).
- [4] Kiseleva A.E. Application of additive technologies in solving shipbuilding design problems. *Nauchno-tekhnicheskiy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva* [Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping], 2017, no. 48-49, pp. 84–88 (in Russ.).
- [5] Dubinkin D.M., Krasavin A.D., Sorokin V.Yu. [Modern condition of FDM-technologies]. *Innovatsii v informatsionnykh tekhnologiyakh, mashinostroenii i avtotransporte* [Innovations in Information Technologies, Machine Building and Motor Transport]. Kemerovo, KuzGTU Publ., 2019, pp. 171–173 (in Russ.).

- [6] Smirnov M.A., Rybkin N.O., Ksenofontova O.L. FDM-tehnologiya: osobennosti primeniya, preimushchestva, nedostatki [FDM technology: application features, advantages, disadvantages]. V: *Problemy ekonomiki, finansov i upravleniya proizvodstvom* [In: Problems of Economy, Finances and Manufacturing Management]. Ivanovo, IGKhTU Publ., 2021, no. 48, pp. 115–122 (in Russ.).
- [7] Kholodilov A.A., Puzynina M.V. [Problems, arising from the three-dimensional printing objects using FDM technology]. *Nauka, obrazovanie, innovatsii: aprobatsiya rezul'tatov issledovaniy* [Science, Education, Innovations: Approbation of Research Results]. Neftekamsk, Mir nauki Publ., 2017, pp. 199–204 (in Russ.).
- [8] Chuvaev I.A., Gabel'chenko N.I. Heat treatment of 3D printed products from plastics. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2019, no. 6-1, pp. 70–75. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.84.6.014> (in Russ.).
- [9] Balashov A.V., Markova M.I. Study of the structure and properties of products obtained by 3d printing. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2019, no. 1. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5618> (in Russ.).

Turchenko M.V. — Student, Department of Material Science, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Goncharova Yu.A. — Assistant, Department of Material Science, Bauman Moscow State Technical University, Head of the Laboratory of Innovative Structural Polymeric Materials at FSBI “Federal Scientific Agroengineering Center VIM”, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Turchenko M.V., Goncharova Yu.A. Investigation of the hardness of 3D-printed products after heat treatment. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2022, no. 05(70). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-05-796.html> (in Russ.).