

*Ю. М. Мкртчян, А. Д. Алганова, О. В. Сучильникова, П. П. Криулина
К. В. Савин, Е. В. Лосев, И. В. Щербатых, Н. В. Сидоренко, М. А. Ваниев*

**ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ УФ-ОБЛУЧЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ
ПРИ ПОСТ-ОБРАБОТКЕ НА СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ,
ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ 3D-DLP ПЕЧАТИ***

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: m.sc.yuri@vstu.ru

Проведено исследование влияния параметров пост-обработки, таких как время и температура УФ-облучения, на физико-механические и термомеханические свойства изделий, получаемых методом 3D-DLP печати. Установлено, что оптимальные условия засветки для достижения максимальной прочности и теплостойкости составляют 60 минут при температуре 60 °С.

Ключевые слова: 3D-DLP печать, фотополимеризующая композиция, пост-обработка, УФ-облучение

Использование методов аддитивных технологий, базирующихся на фотохимическом иницировании радикальной полимеризации, позволяет в широких пределах варьировать свой-

ства получаемых материалов, поскольку для изготовления жидких фотополимеризующихся композиций (ФПК) отсутствует необходимость использования дорогостоящего оборудования,

© Мкртчян Ю. М., Алганова А. Д., Сучильникова О. В., Криулина П. П., Савин К. В., Лосев Е. В., Щербатых И. В., Сидоренко Н. В., Ваниев М. А., 2025.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZUS-2023-0007 на основании Соглашения № 075-03-2024-126 от 17.01.2024 с изменениями).

При проведении исследований использовано оборудование Центра коллективного пользования ВолгГТУ «Физико-химические методы анализа».

в отличие, например, от процессов экструдирования филаментов для FDM-печати. Вместе с тем, пост-обработка полученных полимеризацией изделий в большинстве случаев не может быть сведена к простейшим операциям, базирующимся на физических процессах. Режим пост-обработки, заключающейся в отмывке незаполимеризовавшейся ФПК растворителем, удалении поддерживающих образец элементов, сушке и последующей дополимеризации сшитого полимера [1; 2] в технологии фотополимерной 3D-печати играет значительную роль как в обеспечении точности [3; 4; 5], так и в достижении высокого уровня свойств конечных изделий [6]. Эффективность дополимеризации зависит от химической структуры исходных компонентов ФПК, поскольку она определяет проникающую способность УФ-излучения [7], а также от длительности облучения и температуры, при которой осуществляется дополимеризация [8]. Имеющиеся литературные данные не содержат обобщенных закономерностей, пригодных для прогнозирования оптимальных условий пост-обработки с учетом химической структуры компонентов ФПК. Большая часть исследований посвящена промышленным ФПК с неизвестным составом, например, общего [9] и стоматологического назначения. В работе [10] исследованы биосовместимые ФПК Formlabs Dental LT Clear V2, а также композиции Next-Dent OrthoFlex [11].

Принимая во внимание вышеизложенное, цель настоящей работы заключается в экспериментальной оценке влияния условий пост-обработки на конечные свойства сшитых полимеров, получаемых на базе модельной композиции на основе олигомеров, выпускаемых отечественной промышленностью.

Экспериментальная часть

В качестве основных компонентов ФПК использовали метакриловые олигомеры производства ООО «Химтранзит»: олигоуретандиметакрилат марки ОУМА МТМ и диметакрилат

триэтиленгликоля (ТГМ-3), совместимые во всем диапазоне концентраций.

Фотоинициатором служил ВАРО (фенилбис(2,4,6-триметилбензоил)-фосфиноксид, Omnirad 819, IGM Resins, Нидерланды).

Вязкость композиций определяли на ротационном вискозиметре «Brookfield DV-П+Pro(LV)» (США) в соответствии с ГОСТ 25276-82 при скорости сдвига 10 с^{-1} . Измерительная геометрия – цилиндр в цилиндре, ротор (шпиндель) 21, температура 25 °С и 50 °С, объем образца 8 мл.

Стандартные образцы печатали на 3D-принтере MiniCube ULTRA (источник излучения – светодиод 405 нм, производитель – ООО «Миникуб», Россия). Толщина слоя при печати 37,5 микрон, длительность печати 8 часов.

Досветку образцов осуществляли на установке Formlabs FormCure (Formlabs, США), снабженной светодиодными источниками излучения с длиной волны 405 нм.

Образцы после печати отмывали изопропанолом (ч. д. а.) АО «Экос-1» в течение 20 минут; поддерживающие элементы удаляли механически, затем образцы сушили 24 часа в отсутствии доступа света.

Физико-механические характеристики определяли с использованием универсальной испытательной машины фирмы Zwick/Roell марки Zwicki Z5.0 в соответствии с ГОСТ 11262-2017 (растяжение) и ГОСТ 4648-2014 (изгиб).

Деформационную теплостойкость определяли на установке Gotech HDT-HV-2000-3 (Gotech, Китай) по ГОСТ 12021-2017 по методу В.

Твердость измеряли с помощью портативного твердомера ТН210 (TIME Group Inc, Китай) в соответствии с ГОСТ 24621-2015.

Для определения плотности (ГОСТ 15139-69) использовали плотномер Н-300 S (Hildebrand, Германия).

Обсуждение результатов

Вязкость является одним из определяющих технологических параметров при 3D-печати из ФПК. Первичный отбор композиций производился на основе именно этого показателя.

Таблица 1

Динамическая вязкость композиций при разных соотношениях ТГМ-3 и ОУМА МТМ

Соотношение компонентов			Динамическая вязкость при 25 °С, мПа · с	Динамическая вязкость при 50 °С, мПа · с
№	ТГМ, %	ОУМА МТМ, %		
1	75	25	30,0	16,3
2	50	50	77,3	45,0
3	25	75	341,0	71,6

В целом по диапазону вязкости все три соотношения пригодны для применения в 3D-DLP печати. Вместе с тем, предпочтительней было использование композиции с соотношением компонентов 50/50, на основе которой

и готовились ФПК для дальнейших исследований.

На первом этапе было изучено влияние времени облучения на свойства получаемых образцов (табл. 2).

Таблица 2

Влияние времени пост-обработки на свойства материалов

Показатели Время, мин	0	20	40	60
σ_{pm} , МПа	54	86	89	91
σ_{fm} , МПа	101	115	123	130
Твердость, усл. ед. Шор Д	87			
$T_f0,45$, °С	63	109	116	121
Плотность, г/см ³	1,227			
σ_{pm} – Условная прочность при растяжении, МПа σ_{fm} – Изгибающее напряжение при максимальной нагрузке, МПа $T_f0,45$ – Деформационная теплостойкость, °С				

Досветка (пост-обработка) проводилась в течение 20, 40 и 60 минут с каждой стороны при температуре 60 °C. Также были протестированы образцы без дополнительного УФ-облучения. Представленные в табл. 2 данные демонстрируют рост прочности при растяжении с 54 МПа до 91 МПа (на 68 %), изгибающего напряжения со 101 МПа до 130 МПа (на 28 %)

и деформационной теплостойкости с 63 МПа до 121 МПа (на 92 %), обусловленные закономерным увеличением глубины отверждения сетчатого полимера.

В дальнейшем время пост-обработки составляло 60 минут, а температура облучения варьировалась от 20 ± 5 °C (комнатная) до 80 °C с шагом 20 °C (табл. 3).

Таблица 3

Влияние температуры пост-обработки на свойства материалов

Показатели T, °C	20	40	60	80
σ _{pm} , МПа	86	92	91	81
σ _{fm} , МПа	116	116	130	111
Твердость, усл. ед. Шор Д	87			91
T _f 0,45, °C	90,2	97,0	120,7	134,3
Плотность, г/см ³	1,227			
σ _{pm} – Условная прочность при растяжении, МПа σ _{fm} – Изгибающее напряжение при максимальной нагрузке, МПа T _f 0,45 – Деформационная теплостойкость, °C				

Анализ данных показал, что при повышении температуры до 60 °C происходит увеличение прочностных характеристик. Дальнейшее повышение температуры до 80 °C приводит к снижению прочности при растяжении на 11 % и прочности при изгибе на 15 %. По-видимому, это может объясняться увеличением числа дефектов в структуре материала вследствие слишком быстрого испарения изопропанола в процессе пост-обработки. Одновременно

с этим наблюдается увеличение деформационной теплостойкости образцов, что, вероятно, связано с повышением степени сшивки полимерной матрицы. Данное предположение подтверждается также увеличением твердости.

Таким образом, установлено, что теплостойкость и прочность образцов, полученных методом 3D-DLP печати, существенно зависят от параметров пост-обработки. Выявлено, что оптимальным является режим облучения в те-

чение 60 минут при температуре 60 °С, при котором достигается максимальный рост прочности при растяжении (на 68%), прочности при статическом изгибе (на 28 %) и деформационной теплостойкости (на 92 %).

Полученные данные могут быть использованы для оптимизации технологического процесса 3D-печати и улучшения качества конечных изделий, получаемых из ФПК на базе ОУМА МТМ и ТГМ-3.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Karakurt, I. 3D printing technologies: techniques, materials, and post-processing / I. Karakurt, L. Lin // *Current Opinion in Chemical Engineering*. – 2020. – Vol. 28. – P. 134–143. – ISSN 2211-3398. – DOI: 10.1016/j.coche.2020.04.001.
2. Shah, M. Vat photopolymerization-based 3D printing of polymer nanocomposites: current trends and applications / M. Shah, A. Ullah, K. Azher, A. U. Rehman, W. Juan, N. Aktürk, C. S. Tüfekci, M. U. Salamci // *RSC Advances*. – 2023. – Vol. 13, № 2. – P. 1456–1496. – ISSN 2046-2069. – DOI: 10.1039/d2ra06522c.
3. Cao, J. E. Influence of different post-processing methods on the dimensional accuracy of 3D-printed photopolymers for dental crown applications – A systematic review / J. Cao, X. Liu, A. Cameron, J. Aarts, J. J. Choi // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2024. – Vol. 150. – Art. 106314. – ISSN 1751-6161. – DOI: 10.1016/j.jmbbm.2023.106314.
4. Wu, D. Mechanics of shape distortion of DLP 3D printed structures during UV post-curing / D. Wu, Z. Zhao, Q. Zhang, H. J. Qi, D. N. Fang // *Soft Matter*. – 2019. – Vol. 15, № 30. – P. 6151–6159. – DOI: 10.1039/C9SM00725C.
5. Popescu, V. S. Impact of UV post processing on simple 3D printed parts using masked stereolithography / V. S. Popescu, I. M. Popescu // *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. – 2024. – № 18. – P. 86–92.
6. Piedra-Cascón, W. 3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review / W. Piedra-Cascón, V. R. Krishnamurthy, W. Att, M. Revilla-León // *Journal of Dentistry*. – 2021. – Vol. 109. – Art. 103630. – ISSN 0300-5712. – DOI: 10.1016/j.jdent.2021.103630.
7. Chaudhary, R. Additive manufacturing by digital light processing: a review / R. Chaudhary, P. Fabbri, E. Leoni et al. // *Progress in Additive Manufacturing*. – 2023. – Vol. 8. – P. 331–351. – DOI: 10.1007/s40964-022-00336-0.
8. Danielak, A. The effect of layer height and post-curing temperature on the shape memory properties of smart polymers in vat photopolymerization / A. Danielak, S. S. Chauhan, A. Islam, J. Andrzejewski, D. B. Pedersen // *Rapid Prototyping Journal*. – 2023. – Vol. 29, № 2. – P. 354–365. – DOI: 10.1108/RPJ-06-2021-0138.
9. Jeršovaitė, J. Biocompatibility enhancement via post-processing of microporous scaffolds made by optical 3D printer / J. Jeršovaitė, U. Šarachovaitė, I. Matulaitienė, G. Niaura, D. Baltrikienė, M. Malinauskas // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. – 2023. – Vol. 11. – Art. 1167753. – DOI: 10.3389/fbioe.2023.1167753.
10. Neoh, S. P. Effect of post-processing on the surface, optical, mechanical, and dimensional properties of 3D-printed orthodontic clear retainers / S. P. Neoh, A. Khantachawana, P. Santiwong, R. Chintavalakorn, T. Srihirin // *Clinical Oral Investigations*. – 2025. – Vol. 29, № 1. – P. 48. – DOI: 10.1007/s00784-024-06120-4.
11. Diab, R. R. Effect of printing parameters and post-curing on mechanical properties of photopolymer parts fabricated via 3D stereolithography printing / R. R. Diab, A. Enzi, O. H. Hassoon // *IJUM Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 24, № 2. – P. 225–238. – DOI: 10.31436/ijumej.v24i2.2778.

REFERENCES

1. Karakurt I., Lin L. 3D printing technologies: techniques, materials, and post-processing // *Current Opinion in Chemical Engineering*. – 2020. – Vol. 28. – P. 134–143. – ISSN 2211-3398. – DOI: 10.1016/j.coche.2020.04.001.
2. Shah M., Ullah A., Azher K., Rehman A. U., Juan W., Aktürk N., Tüfekci C. S., Salamci M. U. Vat photopolymerization-based 3D printing of polymer nanocomposites: current trends and applications // *RSC Advances*. – 2023. – Vol. 13, № 2. – P. 1456–1496. – ISSN 2046-2069. – DOI: 10.1039/d2ra06522c.
3. Cao J., Liu X., Cameron A., Aarts J., Choi J. J. E. Influence of different post-processing methods on the dimensional accuracy of 3D-printed photopolymers for dental crown applications – A systematic review // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2024. – Vol. 150. – Art. 106314. – ISSN 1751-6161. – DOI: 10.1016/j.jmbbm.2023.106314.
4. Wu D., Zhao Z., Zhang Q., Qi H. J., Fang D. N. Mechanics of shape distortion of DLP 3D printed structures during UV post-curing // *Soft Matter*. – 2019. – Vol. 15, № 30. – P. 6151–6159. – DOI: 10.1039/C9SM00725C.
5. Popescu V. S., Popescu I. M. Impact of UV post processing on simple 3D printed parts using masked stereolithography // *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. – 2024. – № 18. – P. 86–92.
6. Piedra-Cascón W., Krishnamurthy V. R., Att W., Revilla-León M. 3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review // *Journal of Dentistry*. – 2021. – Vol. 109. – Art. 103630. – ISSN 0300-5712. – DOI: 10.1016/j.jdent.2021.103630.
7. Chaudhary R., Fabbri P., Leoni E. et al. Additive manufacturing by digital light processing: a review // *Progress in Additive Manufacturing*. – 2023. – Vol. 8. – P. 331–351. – DOI: 10.1007/s40964-022-00336-0.
8. Danielak A., Chauhan S. S., Islam A., Andrzejewski J., Pedersen D. B. The effect of layer height and post-curing temperature on the shape memory properties of smart polymers in vat photopolymerization // *Rapid Prototyping Journal*. – 2023. – Vol. 29, № 2. – P. 354–365. – DOI: 10.1108/RPJ-06-2021-0138.
9. Jeršovaitė J., Šarachovaitė U., Matulaitienė I., Niaura G., Baltrikienė D., Malinauskas M. Biocompatibility enhancement via post-processing of microporous scaffolds made by optical 3D printer // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. – 2023. – Vol. 11. – Art. 1167753. – DOI: 10.3389/fbioe.2023.1167753.
10. Neoh S. P., Khantachawana A., Santiwong P., Chintavalakorn R., Srihirin T. Effect of post-processing on the surface, optical, mechanical, and dimensional properties of 3D-printed orthodontic clear retainers // *Clinical Oral Investigations*. – 2025. – Vol. 29, № 1. – P. 48. – DOI: 10.1007/s00784-024-06120-4.
11. Diab R. R., Enzi A., Hassoon O. H. Effect of printing parameters and post-curing on mechanical properties of photopolymer parts fabricated via 3D stereolithography printing // *IJUM Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 24, № 2. – P. 225–238. – DOI: 10.31436/ijumej.v24i2.2778.

*I. M. Mkrtchian, A. D. Alganova, O. V. Suchilnikova, P. P. Kriulina
K. V. Savin, E. V. Losev, I. V. Shcherbatykh, N. V. Sidorenko, M. A. Vaniev*

**THE EFFECT OF DURATION OF UV-RADIATION TIME
AND POST-PROCESSING TEMPERATURE ON THE PROPERTIES
OF THE SAMPLES PRODUCED BY DLP METHOD OF 3D PRINTING**

Volgograd State Technical University

Abstract. A study has been conducted in order to examine the effect of post-processing characteristics, such as time and UV-radiation temperature, on the physico-mechanical and thermomechanical properties of the products produced by the 3D-DLP printing. It has been discovered that the optimal conditions for illumination in order to attain maximum durability and heat-resistance are 60 minutes with the temperature of 60 °C.

Keywords: 3D-DLP printing, photopolymerizing composition, post-processing, UV-radiation