

УДК 004.356 + 06

Е. Д. Аникина, Д. С. Мантуров

ФОТОПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В 3D-ПЕЧАТИ ДЕТАЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА: МОДИФИКАЦИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ¹

Аннотация. Технология аддитивного производства на сегодняшний день позволяет реализовать различные компоненты механических систем, а также применяется в различных областях промышленности, в том числе и конструирование подвижного состава. Фотополимеризация за последние годы широко используется в промышленности, в тоже время свойства полимеров данного типа ограничивают их применение, а именно механическая прочность и трибологические свойства. В данной работе рассмотрены достоинства технологии фотополимеризации, а также возможные методы модификации фотоотверждаемой смолы для повышения механических и трибологических характеристик конечного материала.

Ключевые слова: аддитивное производство, 3D-печать, фотополимеризация, модификация, трение, износ.

Для цитирования: Аникина, Е. Д. Фотополимерные материалы в 3D-печати деталей подвижного состава: модификация для повышения прочности и долговечности / Е. Д. Аникина, Д. С. Мантуров // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 78 – 84.

Введение

На тяговом подвижном составе, а также в машинах и механизмах передача мощности должна осуществляться с максимальной эффективностью и в широком нагрузочно-скоростном диапазоне [1]. Для узлов данного типа износ деталей имеет существенное значение, поскольку может снижать производительность в течении рабочего периода [2]. На производительность системы влияют точность обработки поверхности, а также механические и трибологические свойства применяемых материалов [3]. В условиях работы трибосопряжения другим важным фактором является сочетание материалов, которое необходимо учитывать от области применения и условий эксплуатации, что является актуальным в рамках транспортной отрасли и режимов работы подвижного состава. В современных условиях эксплуатации высокотехнологичных машин, полимеры выделяются в группу материалов, которые способны работать в условиях отсутствия смазочного материала при низких нагрузках, что обеспечивает низкий коэффициент трения [4].

Аддитивное производство

В отличие от традиционных методов создания формы детали, где форма придается точением или формированием под давлением, аддитивное производство (АП) изготавливает деталь из цифровых данных 3D модели послойным формированием [5]. К достоинствам АП относятся: производство детали практически без ограничения формы геометрии; минимизация отходов материала; отсутствие планирования производства [6]. Поскольку АП обладает таким преимуществом как геометрическая свобода, внедрение оптимизации топологии в производимые детали существенно возрастает [7]. Помимо ряда преимуществ,

которыми обладает АП в сравнении с традиционными методами, у данной технологии есть ряд недостатков, а именно: низкий уровень точности, низкие механические характеристики [8]. А также существенным недостатком является отсутствие трибологических свойств созданных деталей при помощи АП, характеристики которых могут не соответствовать аналогичным деталям изготовленным посредством традиционного производственного процесса [9].

Обширный ряд работ исследовательского характера, направленных на изучение и улучшение трибологических свойств деталей АП, сосредоточены на технологиях, использующих термопластичные материалы. К данным технологиям можно отнести: Экструзия материалов (ME) или Синтез на подложке (PBF). Свойства материала в данных технологиях изменяется за счет введения функциональных добавок (твердые неорганические наполнители [10], твердые смазочные материалы [11]) или оптимизации параметров технологического процесса [12].

Помимо методов создания деталей путем плавления термопластичных материалов, существует метод Фотополимеризации (ФП). Метод ФП заключается в послойном отверждении жидкого фотополимера, находящегося в ванне, с помощью фотополимеризации, активируемой светом. Первой технологией в данном секторе АП является метод Стереолитография (SLA) (рис. 1), представленный Чарльзом Халлом в 1984 году.

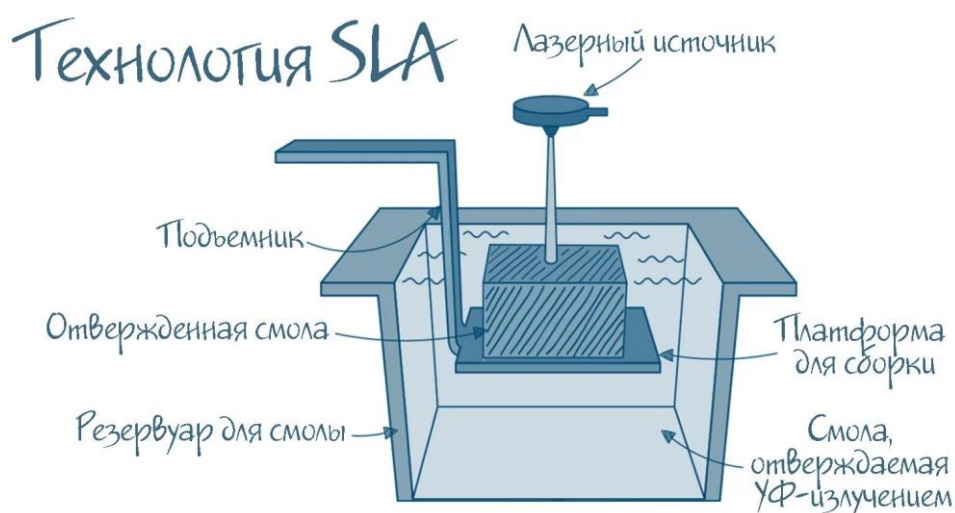


Рис. 1. Технология SLA печати

ФП создает детали путем полимеризации основных элементных блоков раствора (мономеров и олигомеров) в шитую макромолекулярную структуру (рис. 2). В технологии SLA фотополимер затвердевает вследствие точечного воздействия лазерного луча на поверхность.

В реализации метода ФП появились альтернативные подходы, которые используют проекцию маски слоя на дно резервуара, источниками света в данном случае выступают Цифровой световой проектор (DLP) или Жидкокристаллический дисплей (LCD) [6]. А также новые разработки в области ФП: использованием технологии непрерывного жидкостного интерфейса (CLIP), быстрое объемное изготовление с использованием голографического моделирования световых полей [13] и возможность многокомпонентной 4D-печати [14].

Жидкое связующее
вещество с мономерами,
олигомерами и
фотоинициаторами

Фотоинициаторы
распадаются под
действием УФ-излучения
на радикалы

Освобожденная энергия
радикалов обеспечивает
полное сшивание
макромолекул
(полимеризацию)
мономеров и олигомеров

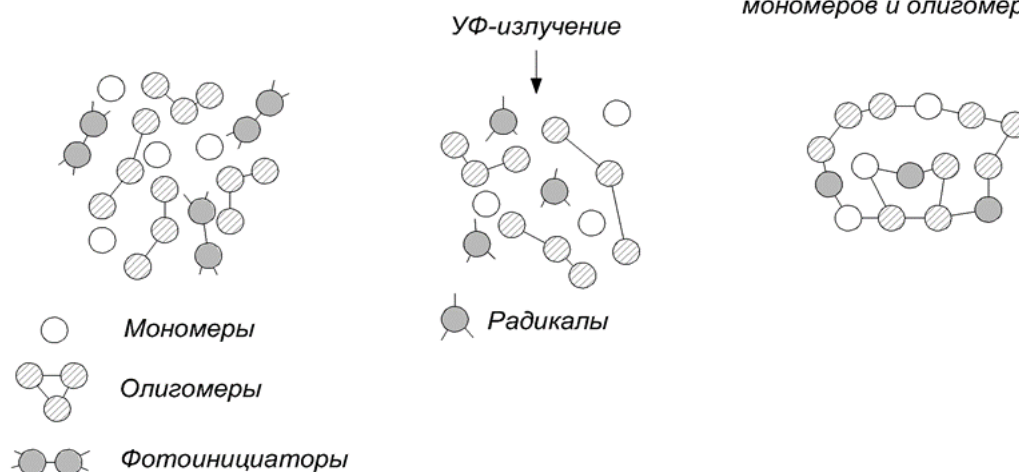


Рис. 2. Этапы процесса полимеризации

Преимущество ФП при применении в АП это изготовление деталей с высоким разрешением и достаточно низкой шероховатостью поверхности [6]. Закон оптической дифракции ($d=1.22*\lambda*f/D$, где λ – длина волны, f – фокусное расстояние, а D – диаметр апертуры.) ограничивает разрешение ФП. Для технологии DLP разрешение составляет 6,5 мкм при следующих параметрах: $\lambda=400$ нм, $f=400$ мм и $D=30$ мм, [8], технология SLA в тоже время способна дать разрешение до 0,4 мкм [15]. Помимо использования различных технологий для повышения качества, также возможно адаптировать деталь под требования узла за счет изменения химического состава смолы [16] или введением функциональных добавок [17].

Модификация

Несмотря на вышеперечисленные достоинства технологии ФП, исследований применения данных материалов в трибологической области крайне мало. Бергер и др. изучали точность изготовления в сравнении технологий стереолитографии и экструдирования. Установлено что технология ФП дает более высокую точность. Также были проведены стендовые испытания с использованием изготовленных шестерен, исследования показали, что шестерни, изготовленные методами экструдирования вышли из строя по причине излома, в тоже время образцы, изготовленные методом ФП, выдержали исследования и показали отсутствие износа [8].

Данниган и др. проводили исследования модификации фотополимера отходами полиэстера и порошка полиамида на трибологические свойства образцов. Установлено что увеличение концентрации полиэфирного и полиамидного порошка снижает коэффициент трения и износ [18].

Ханон и др. [19] провели испытание на компонентах, напечатанных с помощью DLP, и длительной обработкой УФ-излучением, испытательная установка применялась по схеме цилиндр-на-пластине с возвратно-поступательным движением. Коэффициент трения составил приблизительно 0,72.

В другой статье, опубликованной два года спустя, Ханон и др. [20] также представили влияние графена, присутствующего в полимерной матрице, отвержденной УФ-излучением. Он заметил, что добавление наночастиц в полимерную матрицу приводит к разрушению УФ-излучения, и как следствие неравномерное отверждение смолы. Таким образом, трибологические свойства ухудшились при содержании графена более 2% по весу.

Каземи и др. [21] изучили абразивную стойкость напечатанных DLP-компонентов на трибометре «штифт-диск», где оба компонента были изготовлены при помощи технологии DLP и не были подвергнуты последующему отверждению УФ-светом, с той разницей, что штифт был помещен под разными углами. В исследовании говорится, что наиболее важными факторами, определяющими скорость износа, были нагрузка, приложенная к штифту.

В качестве широко применяемых добавок для улучшения трибологических характеристик полимерных материалов являются такие наполнители как политетрафторэтилен (ПТФЭ), графит и MoS₂, данные добавки значительно снижают износ и коэффициент трения, но также влияют на снижение механических характеристик [22].

Слапник и др. [23] изучили влияние твердых смазок, таких как ПТФЭ, графит и MoS₂, добавленных в различных концентрациях в состав смолы, полученной из олигомера CN964A85, мономера SR605D в соотношении 7:3 и фотоинициатора. Образцы также были подвергнуты последующему отверждению УФ-светом в течение 900 (с) и испытаны на трибометре «штифт-диск». Результаты показали, что все образцы, содержащие ПТФЭ, продемонстрировали снижение коэффициента трения примерно с 0,7 до 0,5. Похожий эффект был отмечен для скорости износа. Добавление графита и MoS₂ практически не оказало влияния на трибологическое поведение.

Хюттинг и др. [24] провели сравнение образцов, изготовленных с помощью обычных, аддитивных и субтрактивных технологий, с точки зрения износоустойчивости, используя ПММА в качестве базового материала. Испытания на износ проводились во влажных условиях при количестве циклов до 5000, нормальной нагрузке 5 Н и амплитуде скольжения 10 мм. Испытания на износ не показали существенной разницы между образцами.

В работе Ханон и др. [25] проводились исследования влияния добавления графена в состав фотополимерной смолы на механические свойства. Образцы базовой смолы показали более высокие механические свойства в сравнении с наполненным фотополимером. Как следствие добавление графена вызывает снижение пластичности, в свою очередь данное свойство может оказать положительный эффект при применении узлах трибосопряжений.

Заключение

Рассмотрены основные вопросы использования фотополимерных смол и их модификации для улучшения механических и трибологических свойств.

Аддитивные технологии дают возможность изготавливать детали сложной геометрии, а также минимизировать количество продуктов отработки. В свою очередь данная технология обладает недостаточными механическими и трибологическими характеристиками для использования в трибосопряжениях с большими нагрузками.

Использование различных наполнителей и функциональных добавок для модификации смол позволит значительно улучшить их механические характеристики. Обзор исследований показал, что добавление твердых неорганических наполнителей может снизить коэффициент трения и увеличить износостойкость. Для достижения необходимых свойств создаваемых материалов необходим комплексный подход для выбора компонентов, основанный на теоретической оценке характеристик как применяемого материала, так и конечного продукта.

Таким образом, модификация фотополимерных материалов представляет собой перспективное направление исследований для повышения прочности и долговечности изделий, созданных с использованием аддитивных технологий, что позволит не только расширить области применения данной технологии, но и будет способствовать развитию новых решений для различных отраслей промышленности, в том числе для транспортной отрасли в рамках разработки и конструирования перспективного подвижного состава.

Библиографический список

1. **Bell, P. C.** Mechanical Power Transmission; Bell, P.C., Ed.; Palgrave Macmillan Press Limited: London, UK, (1971); ISBN 978-1-349-01197-1.
2. **Hu, C.** Development of a gear vibration indicator and its application in gear wear monitoring / Hu, C.; Smith, W.A.; Randall, R.B.; Peng, Z. // Mech. Syst. Signal Process. (2016), 76–77, 319–336.
3. **Radzevich, S. P.** Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture, 2nd ed./ Radzevich, S.P.// Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, (2012); ISBN 9780429109065.
4. **Bhushan, B.** Principles and Applications of Tribology, 2nd ed.; John Wiley & Sons, Ltd.: Chichester, UK, (2013); ISBN 9781118403020.
5. ISO/ASTM 52900:2015 Standard Terminology for Additive Manufacturing—General Principles—Terminology; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, (2015).
6. **Gibson, I.** Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B. // 2nd ed.; Springer: New York, NY. USA, (2015); ISBN 9781493921133.
7. **Liu, J.** Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing. / Gaynor, A.T., Chen, S., Kang, Z., Suresh, K., Takezawa, A., Li, L., Kato, J., Tang, J., Wang, C.C.L. // Struct. Multidiscip. Optim. (2018), 57, 2457–2483.
8. **Berger, U.** Aspects of accuracy and precision in the additive manufacturing of plastic gears / Berger, U. // Virtual Phys. Prototyp. (2015), 10, 49–57.
9. **Amiruddin, H.** Comparative study of the tribological behaviour of 3D-printed and moulded ABS under lubricated condition. / Amiruddin, H.; Abdollah, M.F. Bin; Norashid, N.A. // Mater. Res. Express (2019), 6, 085328.
10. **Arif, M. F.** Multifunctional performance of carbon nanotubes and graphene nanoplatelets reinforced PEEK composites enabled via FFF additive manufacturing. / Arif, M.F. Alhashmi, H., Varadarajan, K.M., Koo, J.H., Hart, A.J., Kumar, S. // Compos. Part B Eng. (2020), 184, 107625.
11. **Bai, J.** Tribological and mechanical properties of MoS₂ enhanced polyamide 12 for selective laser sintering. / Bai, J., Song, J., Wei, J. // J. Mater. Process. Technol. (2019), 264, 382–388.
12. **Palma, T.** Multiscale mechanical and tribological characterizations of additively manufactured polyamide 12 parts with different print orientations. / Palma, T., Munther, M., Damasus, P., Salari, S., Beheshti, A., Davami, K. // J. Manuf. Process. (2019), 40, 76–83.
13. **Shusteff, M.** One-step volumetric additive manufacturing of complex polymer structures. / Shusteff, M., Browar, A.E.M., Kelly, B.E., Henriksson, J., Weisgraber, T.H., Panas, R.M., Fang, N.X., Spadaccini, C.M. // Sci. Adv. (2017), 3, eaao5496.
14. **Schwartz, J. J.** Multimaterial actinic spatial control 3D and 4D printing. / Schwartz, J.J., Boydston, A.J.// Nat. Commun. (2019), 10, 1–10.
15. **Maruo, S.** Submicron stereolithography for the production of freely movable mechanisms by using single-photon polymerization. / Maruo, S., Ikuta, K. // Sensors Actuators A Phys. (2002), 100, 70–76.
16. **Slapnik, J.** Tailoring properties of photopolymers for additive manufacturing with mixture design. / Slapnik, J., Pulko, I. // Prog. Addit. Manuf. (2020), DOI:10.1007/s40964-020-00147-1.
17. **Markandan, K.** Enhanced mechanical properties of 3D printed graphene-polymer composite lattices at very low graphene concentrations. / Markandan, K., Lai, C.Q. // Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. (2020), 129, 105726.
18. **Dunnigan, R.** Beneficial usage of recycled polymer particulates for designing novel 3D printed composites. / Dunnigan, R., Clemens, J., Cavalli, M.N., Kaabouch, N., Gupta, S. // Prog. Addit. Manuf. (2018), 3, 33–38.

19. **Hanon, M.** Tribological and mechanical properties investigation of 3D printed polymers using DLP technique. / Hanon, M., Zsidai, L. // 2nd International Conference on Materials Engineering & Science (ICONMEAS 2019). (2020), DOI:10.1063/5.0000267.
20. **Hanon, M.,** Ghaly A., Zsidai L., Klébert S., Tribological characteristics of digital light processing (DLP) 3D printed graphene/resin composite: Influence of graphene presence and process settings, *Materials & Design*, 218, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022>
21. **Kazemi, M.** An experimental and theoretical study of the abrasion performance of digital light processing parts. / Kazemi, M., Rahimi, A.// *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 235(6-7), 1022–1035., (2020). DOI:10.1177/0954405420981333.
22. **Alajmi, M.** Tribological characteristics of graphite epoxy composites using adhesive wear experiments. / Alrashdan, K.R., Alsaeed, T., Shalwan, A. // *J. Mater. Res. Technol.* (2020), 9, 13671–13681.
23. **Slapnik, J.,** Stiller, T., Wilhelm, T., Hausberger, A., Influence of Solid Lubricants on the Tribological Performance of Photocurable Resins for Vat Photopolymerization. *Lubricants*, 8(12), 104. (2020). DOI:10.3390/lubricants8120104.
24. **Huettig, F.,** Polishability and wear resistance of splint material for oral appliances produced with conventional, subtractive, and additive manufacturing. / Huettig, F., Kustermann, A., Kuscu, E., Geis-Gerstorf, J., Spintzyk, S. // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 75, 175–179, (2017) DOI:10.1016/j.jmbbm.2017.07.019.
25. Hanon, Muammel & Ghaly, Arsany & Zsidai, L. & Szakal, Zoltan & Szabó, István & Kátai, László. (2021). Investigations of the Mechanical Properties of DLP 3D Printed Graphene/Resin Composites. *Acta Polytechnica Hungarica*. 18. 143-161. 10.12700/APH.18.8.2021.8.8.

E. D. Anikina, D. S. Manturov

PHOTOPOLYMERIC MATERIALS IN 3D PRINTING OF ROLLING STOCK PARTS: MODIFICATION TO INCREASE STRENGTH AND DURABILITY

Abstract. Today, additive manufacturing technology allows various components of mechanical systems, and is also used in various industries. Photopolymerization has been widely used in industry in recent years, while the properties of this type of polymers limit their use, namely mechanical strength and tribological properties. This paper discusses the advantages of photopolymerization technology, as well as possible methods for modifying photocurable resin to improve the mechanical and tribological characteristics of the final material.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, photopolymerization, modification, friction, wear.

For citation: Anikina, E. D. Photopolymeric Materials in 3D Printing of Rolling Stock Parts: Modification to Increase Strength and Durability / E. D. Anikina, D. S. Manturov // *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobseniya*. – 2025. – № 1. – P. 78 – 84.

Сведения об авторах

Аникина Елена Дмитриевна
Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
пост-дипломная студентка

Information about the authors

Anikina Elena Dmitrievna
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Mechanics»,
Post-graduate Student,

аспирант,
e-mail: al.anikina2002@mail.ru

e-mail: al.anikina2002@mail.ru

Мантуров Дмитрий Сергеевич
Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
Заведующий лабораторией,
кандидат технических наук,
e-mail: manturoff_dc@mail.ru

Manturov Dmitriy Sergeevich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Mechanics»,
Head of the Laboratory,
Candidate of Technical Scienses,
e-mail: manturoff_dc@mail.ru