

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2024-43-86-89>

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ФОТОПОЛИМЕР ПРИ АБРАЗИВНОМ ИЗНАШИВАНИИ ЗАКРЕПЛЕННЫМ ЗЕРНОМ

*Бирюков В.П., Горюнов Я.А.*

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,  
Москва, Россия*

**Ключевые слова:** износ, потеря массы, закрепленное абразивное зерно, фотополимер, износостойкость, ультрафиолетовое облучение, абразивный износ, микрорезание.

**Аннотация.** В работе представлены результаты морфологических исследований поверхностей трения и триботехнических испытаний на абразивное изнашивание закрепленным зерном образцов из фотополимерной смолы. Получены закономерности стойкости к абразивному изнашиванию закрепленным абразивным зерном в зависимости от свойств фотополимера. Наибольшей износостойкостью обладал образец, дополнительно отвержденный прямыми лучами ультрафиолета.

## EFFECT OF ULTRAVIOLET IRRADIATION ON PHOTOPOLYMER UNDER ABRASIVE WEAR BY FIXED GRAIN

*Biryukov V.P., Goryunov Ya.A.*

*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia*

**Keywords:** wear, weight loss, fixed abrasive grain, photopolymer, wear resistance, ultraviolet irradiation, abrasive wear, micro-cutting.

**Abstract.** The paper presents the results of morphological studies of friction surfaces and tribological tests for abrasive wear of samples made of photopolymer resin by fixed grain. The regularities of resistance to abrasive wear by fixed abrasive grain depending on the properties of the photopolymer are obtained. The highest wear resistance was demonstrated by the sample additionally cured by direct ultraviolet rays.

Аддитивное производство, также известное как 3D-печать – это революционная технология, которая привлекла внимание всего мира. Цифровая светодиодная проекция (Digital Light Processing (DLP)) является широко используемой технологией 3D-печати, основанной на принципе отверждения фотополимерной смолы прямыми лучами ультрафиолетового излучения. Данная технология нашла широкое применение для изготовления неотчетливых механизмов, форм для литья под давлением, функциональных прототипов и конечных изделий.

Цилиндрические образцы [1] были изготовлены из фотоотверждаемой смолы на основе полиуретана (ПУ) длиной 15,2 мм и диаметром 8 мм с толщиной отверждаемого слоя за один проход 35, 50 и 100 мкм под углом 0°, 45° и 90° к поверхности печатной платформы. После выращивания образцы отверждались в течение 30 минут. Твердость образцов по Шору составляла 78 D. Испытания для определения триботехнических характеристик

проводились по схеме «образующая цилиндрического полимерного образца – плоскость» (сталь S355) при нагрузке 150 Н в течение 60 минут с частотой 30 Гц и длиной хода 50 мм. Коэффициент трения находился в диапазоне от 0,62 до 0,75. Скорость изнашивания образцов с высотой отверждаемых слоев 35, 50 и 100 мкм, расположенных под углом 0°, составляла 1,12, 1,38 и  $0,69 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>/Нм, расположенных под углом 45°, составляла 0,41, 0,99 и  $0,62 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>/Нм, расположенных под углом 90°, составляла 0,78, 1,18 и  $0,49 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>/Нм, соответственно. Глубина лунки износа образцов с высотой отверждаемых слоев 35, 50 и 100 мкм, расположенных под углом 0°, достигла 0,036, 0,041 и 0,025 мм, расположенных под углом 45°, достигла 0,018, 0,033 и 0,025 мм, расположенных под углом 90°, достигла 0,028, 0,037 и 0,021 мм, соответственно. Было выявлено, что наилучше показания коэффициента трения, скорости изнашивания и глубины износа были достигнуты на образцах с высотой отверждаемых слоев 35 мкм и расположением в 45°.

Образцы [2] с размерами 15×10×10 мм изготавливались из фотоотверждаемой термостойкой смолы на основе уретандиметакрилата методом цифровой обработки светом (DLP) с высотой отверждаемого слоя 100 мкм, выращенных под углом 0° относительно плоскости печатного стола и получались экструзией термопластичного пластика на основе полилактида (PLA) с высотой слоя 200 мкм под углом 0° относительно плоскости печатного стола методом послойного наложения (FDM). Образцы, изготовленные методом DLP, подвергались дополнительному отверждению в течение 15 минут в азотной камере. Испытания для определения триботехнических характеристик проводились по схеме «шар-плоскость (фотополимер)» при нагрузке 49 Н с частотой 1,2 Гц в течение 20000 циклов. Контрообразцы радиусом 1,5 мм были изготовлены из диоксида циркония и сплава CoCr. Результаты испытаний показывали, что в паре трения с контрообразцом из сплава CoCr наименьший объем износа 1,82 мм<sup>3</sup> имели образцы, выращенные методом DLP. Глубина лунки износа достигла 2,7 мм. При этом в паре трения с контрообразцом из диоксида циркония объем износа составлял 0,96 мм<sup>3</sup>, а глубина лунки износа 0,32 мм. Установлено, что стойкость образцов, изготовленных методом DLP, к истиранию примерно в 1,89 раза выше, чем у образцов, полученных методом FDM.

Экспериментальные исследования проводили на образцах [3] диаметром 8 и длиной 15,2 мм, выращенных из фотоотверждаемой смолы на основе полиуретанакрилата и 4-морфолина, под углом 0°, 45° и 90° относительно плоскости печатной платформы. Вязкость и плотность смолы составляли 120...140 МПа и 1,12 г/м<sup>3</sup>, соответственно. Все образцы были напечатаны с толщиной отверждаемого слоя 100 мкм. После выращивания образцы фотополимеров нагревали в печи при температуре 60°C в течение 30 минут. Первую партию образцов оставляли без дополнительного отверждения, вторая партия подвергалась дополнительному отверждению прямыми лучами ультрафиолетового излучения в течение 30 минут. Испытания для определения трибологических характеристик проводились по схеме

«образующая цилиндрического полимерного образца – плоскость стальной пластины» при нагрузке 150 Н с частотой 10 Гц и длиной хода 6 мм. Наибольший коэффициент трения 0,79 был выявлен у образца, напечатанного под углом 45°. Наименьший коэффициент трения 0,46 имел образец, выращенный под углом 0° и не подвергавшийся дополнительному отверждению лучами ультрафиолета. Наибольшая глубина лунки износа 0,04 мм была зафиксирована у образца, напечатанного под углом 45° и не подвергавшегося дополнительной обработке прямыми лучами ультрафиолета. При этом наименьшую глубину износа 0,009 мм имел образец, выращенный под углом 90°, подвергшийся дополнительному отверждению лучами ультрафиолета. Установлено, что дополнительное отверждение ультрафиолетовым излучением повышает износостойкость фотоотверждаемой смолы.

Целью данного исследования является определение величины абразивного изнашивания закрепленным абразивом образцов, изготовленных из фотополимерного материала при помощи технологии 3D-печати.

Образцы были выращены на фотополимерном 3D-принтере Anycubic Photon Mono 2 по технологии DLP. В качестве материала для выращивания была использована бесцветная смола Anycubic ECO UV Resin на основе эпоксидированного соевого масла. Первая партия образцов 1.1, 1.2, 1.3 испытывалась после выращивания и обработки в изопропиловом спирте, вторая партия образцов 2.1, 2.2, 2.3 была подвергнута дополнительному УФ-облучению в течение 5 минут. Габариты образцов составляли 70×20×10 мм.

Испытания на абразивное изнашивание закрепленным зерном выполняли по схеме: «торец кольцевой оправки с наклеенной наждачной бумагой – широкая сторона образца». Для испытаний использовали наждачную бумагу P120 с абразивным зерном карбида кремния. Испытания проводились при нагрузке 1 МПа, в течение 20 секунд. Результаты испытаний на абразивное изнашивание закрепленным зерном представлены в таблице 1.

Табл. 1. Испытание на абразивное изнашивание закрепленным абразивом

№ образца	Масса до испытаний, г	Масса после испытаний, г	Потеря массы, г	Средняя потеря массы, г
1.1	19,5436	19,4022	0,1414	0,1419
1.2	19,4022	19,2618	0,1404	
1.3	19,2618	19,1179	0,1439	
2.1	19,4716	19,3932	0,0784	0,0775
2.2	19,3932	19,3099	0,0833	
2.3	19,3099	19,2389	0,0710	

Как видно из таблицы 1, средняя потеря массы образцов, подверженных дополнительному ультрафиолетовому облучению, составляла 0,0775 г, что в 2 раза ниже, чем у образцов без дополнительного облучения 0,1419 г.

Общий вид поверхностей трения образцов фотополимера представлен на рисунке 1, на котором видно, что основным механизмом износа является микрорезание.

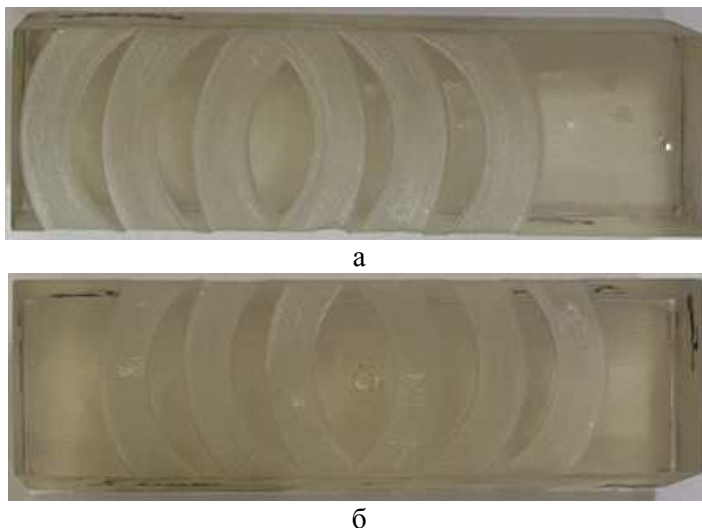


Рис. 1. Общий вид поверхностей трения образцов фотополимеров: а – 1.1, б – 2.1

**Выводы.** Проведенные эксперименты показали, что максимальной износостойкостью при изнашивании закрепленным абразивным зерном обладали образцы, подвергнутые дополнительному ультрафиолетовому отверждению в течение 5 минут.

#### Список литературы / References

1. Hanon M.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*. 2022, vol. 218, pp. 110718. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110718.
2. Choi M.J., Kwon J.S. Wear resistance of dental resin crowns in accordance with different additive manufacturing technologies and abrader types during chewing simulations // *Korean Journal of Dental Materials*. 2023, vol. 50 (4), pp. 217-231. DOI: 10.14815/kjdm.2023.50.4.217.
3. Hanon M.M., Zsidai L. Tribological and Mechanical Properties Investigation of 3DPrinted Polymers Using DLP Technique // *AIP Conference Proceedings*. 2020, vol. 2213, pp. 020205. DOI: 10.1063/5.0000267.

<b>Бирюков Владимир Павлович</b> – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник	<b>Biryukov Vladimir Pavlovich</b> – candidate of technical sciences, leading researcher
<b>Горюнов Ярослав Алексеевич</b> – младший научный сотрудник	<b>Goryunov Yaroslav Alekseevich</b> – junior researcher
Laser-52@yandex.ru	

*Received 21.08.2024*