

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ ФОТОПОЛИМЕРОВ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВНЫМ ЗЕРНОМ

Бирюков В.П., Горюнов Я.А.

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

Ключевые слова: износ, свободное абразивное зерно, фотополимер, износостойкость, потеря массы, микрорезание.

Аннотация. В работе представлены результаты морфологических исследований поверхностей трения и триботехнических испытаний на абразивное изнашивание свободным зерном образцов из фотополимерной смолы. Получены закономерности стойкости к абразивному изнашиванию свободным абразивным зерном в зависимости от свойств фотополимера. Наибольшая износостойкость зафиксирована у образца, дополнительно отвержденного прямыми лучами ультрафиолетового излучения.

DETERMINATION OF THE ABRASIVE WEAR OF PHOTOPOLYMERS BY FREE ABRASIVE GRAIN

Biryukov V.P., Goryunov Ya.A.

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

Keywords: wear, free abrasive grain, photopolymer, wear resistance, weight loss, micro-cutting.

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

3D-печать широко применяется для мелкосерийного изготовления функциональных изделий. Она внедрена во многих отраслях промышленности. Использование 3D-печати в аэрокосмической отрасли объясняется возможностью создавать инновационные конструкции любой сложности. Детали спутников, ракет и других космических объектов печатаются из металла, полимеров и других материалов. В медицине технология 3D-печати крайне важна. При помощи 3D-принтера можно напечатать прототипы органов, протезы, имплантаты, замещающие участки костных тканей. При использовании 3D-печати по технологии цифровой светодиодной проекции (Digital Light Processing (DLP)) возможно с высокой точностью преобразовывать спроектированные конструкции в физические объекты.

Образцы [1] диаметром 30 и высотой 7 мм были изготовлены из фотоотверждаемой смолы по технологии цифровой светодиодной проекции (DLP). Высота отверждаемых слоев составляла 50 мкм. Длительность засвечивания одного слоя равнялась 8 секунд. Образцы делили на партии. Первая партия образцов не подвергалась дополнительному отверждению.

Вторая и последующие партии образцов дополнительно подвергались отверждению прямыми лучами ультрафиолетового излучения в течение 3, 4, 5 и 20 секунд, соответственно. Испытания по определению триботехнических характеристик проводили по схеме: «шар-плоскость» при нагрузке 10 Н и скорости скольжения 1 м/с. Стальной шарик диаметром 6,35 мм, выступающий в роли контробразца, был неподвижен. Время каждого испытания составляло 300 секунд. Наименьший коэффициент трения 0,43 был выявлен у образца, подвергнутого обработке прямыми лучами ультрафиолета в течение 20 секунд. При этом наибольший коэффициент трения 0,50 был у образца, не подвергнутого дополнительному отверждению ультрафиолетом. Испытания показали заметное снижение коэффициента трения при более длительном отверждении образцов.

В работе, посвященной определению трибологических характеристик, образцы [2] с размерами $20 \times 20 \times 3,5$ мм из фотоотверждаемой смолы на основе акрилата, вязкостью 0,8-1,15 Па и относительной плотностью 1,15, были изготовлены на 3D-принтере по технологии DLP. Первая партия образцов была выполнена без добавления наночастиц алмазов, вторая партия образцов с добавлением наночастиц алмазов с размером частиц менее 10 нм. Высота отверждаемых слоев составляла 100 мкм. После выращивания образцы подвергали отверждению прямыми лучами ультрафиолета в течение 15 минут. Испытания для определения триботехнических характеристик проводили по схеме: «шар-плоскость» при нагрузке 5 Н с применением смазки PBS в течение 10000 циклов. Шар из стали SUS 304 диаметром 5 мм, совершал возвратно-поступательные движения с частотой 0,5 Гц с длиной хода 2 мм. Путь трения при испытании одного образца составил 40 мм. Максимальное значение коэффициента трения 0,21 зафиксировано при испытании образцов из фотоотверждаемой смолы без добавления алмазных наночастиц. Установлено, что скорость изнашивания $2,1 \cdot 10^{-8}$ мм³/Нм образцов из фотоотверждаемой смолы без добавления наночастиц алмазов была заметно выше, чем у образцов с добавлением наночастиц алмазов $0,8 \cdot 10^{-8}$ мм³/Нм.

Фотополимерные образцы [3] в виде дисков диаметром 20 и высотой 3 мм и контробразцы в виде шара диаметром 10 мм были изготовлены из одной фотоотверждаемой смолы на 3D-принтере по технологии DLP. Слои высотой 25 мкм были расположены под углом 0° относительно плоскости платформы. После выращивания образцы были подвергнуты сушке при температуре 120°C в течение 120 часов. Испытания для определения триботехнических характеристик были проведены с использованием схемы: «шар-торец диска (образца фотополимера)» при нагрузке 5 Н. Контробразец (шар) совершал возвратно-поступательные движения со скоростью 2 см/с в течение 50000 циклов. Длина хода шара составляла 4 мм. Путь трения составлял 400 м. Наибольший коэффициент трения образца при проведении испытаний имел значение около 0,44. Установлено, что контробразец (шар) заметно уступал по объемному износу $0,36 \cdot 10^{-6}$ мм³ дисковому образцу, имевшему объемный износ $1,16 \cdot 10^{-6}$ мм³.

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

Образцы с размерами 70×20×10 мм были изготовлены по технологии DLP на фотополимерном 3D-принтере Anycubic Photon Mono 2. Для печати использовали фотоотверждаемую смолу Anycubic ECO UV Resin Clear на основе эпоксицированного соевого масла. Первая группа образцов, обозначенных как 1.1, 1.2, 1.3, была испытана после выращивания, обработки изопропиловым спиртом и сушки, вторая группа образцов 2.1, 2.2, 2.3 прошла дополнительную процедуру отверждения прямыми лучами ультрафиолета в течение 5 минут.

Испытания на абразивное изнашивание свободным абразивным зерном выполняли по схеме: «образующая поверхность резинового диска – широкая сторона плоского образца (фотополимер)». В качестве абразива использовали кварцевый песок с размером частиц 0,2-0,6 мм. Подачу песка осуществляли с помощью дозатора через калиброванное отверстие гравитационным способом. Нагрузка на образец была 15 Н. Продолжительность испытаний составляла 5 минут. Результаты испытаний на абразивное изнашивание свободным абразивным зерном представлены в таблице 1.

На рисунке 1 представлены образцы фотополимеров без дополнительного облучения (рис. 1, а) и с облучением ультрафиолетовым излучением (рис. 1, б) после испытаний незакрепленным абразивным зерном.

Табл. 1. Испытание на абразивное изнашивание свободным абразивом

№ образца	Масса до испытаний, г	Масса после испытаний, г	Потеря массы, г	Средняя потеря массы, г
1.1	17,9789	17,7626	0,2163	0,2116
1.2	17,7626	17,5578	0,2048	
1.3	17,5578	17,3440	0,2138	
2.1	18,0180	17,8661	0,1519	0,1703
2.2	17,8661	17,6960	0,1701	
2.3	17,6960	17,5071	0,1889	



а



б

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

Как видно из рисунка 1, площадь поверхности трения и глубина лунки износа меньше у образца, дополнительно обработанного прямыми лучами ультрафиолетового излучения. Основной механизм изнашивания – микрорезание.

Выводы. Проведенные эксперименты показали, что максимальной износостойкостью при изнашивании свободным абразивным зерном обладали образцы, подвергнутые дополнительному отверждению ультрафиолетовым излучением в течение 5 минут.

Список литературы / References

1. Macovei G., Stamate C.V., Paleu V. Tribological characteristics of additive manufactured components by digital light processing // Acta Technica Napocensis. 2023, vol. 66, pp. 477-484.
2. Mangal U., Min Y.J., Seo J.Y., Kim D.E., Cha J.Y., Lee K.J., Kwon J.S., Choj S.H. Changes in tribological and antibacterial properties of poly (methyl methacrylate)-based 3D-printed intra-oral appliances by incorporating nanodiamonds // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2020, vol. 110, pp. 103992. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2020.103992.
3. Paterlini A., Stamboulis A., Turq V., Laloo R., Schwentenwein M., Brouczek D., Piccinini M., Bertrand G. Lithography-based manufacturing of advanced ceramics for orthopaedic applications: A comparative tribological study // Open Ceramics. 2021, vol. 8, pp. 1001700. DOI: 10.1016/j.oceram.2021.100170.

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

Received 07.08.2024