

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ ИЗ PLA

канд. техн. наук, доцент А. И. Ермаков, А.А. Третьякова, БНТУ, г. Минск

Резюме. Отличительной особенностью машиностроительной отрасли последнего времени является снижение металлоемкости изделий и расширение использования пластиков [1-3]. Одним из актуальных направлений в производстве пластиковых изделий является применение 3d-печати. Данный метод позволяет быстро расширить номенклатуру производимых изделий, при этом, не требует длительной конструкторско-технологической подготовки производства по изготовлению оснастки и инструментов, снижает расход материала за счет возможности варьирования коэффициент заполнения [4-5]. Наиболее распространенным пластиком для 3d-печати являются PLA [6-8]. Данный пластик является биоразлагаемым, легко перерабатывается, обладает высокой прочностью при температурах не выше 50°C [10-20]. В работе приведены данные о влиянии температуры сопла при печати образцов из PLA, в пределах варьирования от 190 до 210°C, на их абразивный износ.

Ключевые слова: 3D-печать, PLA, технология, триботехнические характеристики, абразивный износ, сопло, температура печати.

Введение.

В машиностроении достаточно давно вместо дорогостоящих металлов и сплавов применяют различные пластики. Применение пластиков разнообразно, их используют для изготовления рабочих органов машин, деталей их привода, корпусов, элементов автоматики и управления. Следует отметить, что долговечность деталей и узлов механизмов из пластиков зачастую не уступает традиционным, но при этом значительно снижается масса конструкций [1-5]. Наиболее перспективных, с точки зрения экологии, вариантов замены металлов является использование в конструкциях узлов PLA (полилактид или полимолочная кислота) [2, 3]. PLA – биоразлагаемый, биосовместимый термопластик природного происхождения, применяемый в 3d-печати [2, 6]. На данный момент PLA широко применяют для изготовления корпусных деталей и опорных элементов в конструкциях 3d-принтеров, в литейном производстве, в качестве мастер-моделей для изготовления силиконовых форм для отливки кондитерских масс [2, 3]. Механические характеристики изделий, полученных методом 3d-печати из PLA подробно изучены во многих научных работах, как за рубежом, так и в Республике Беларусь [1-5, 7-20]. Но до настоящего времени в открытых информационных источниках недостаточно данных о триботехнических характеристиках таких изделий и влиянии параметров печати на эти характеристики. Исследования в данной области позволят получить данные о поведении деталей из PLA в условиях абразивного износа и расширить сферы его применения.

Основная часть.*Материалы и методы.*

Трибология – наука о трении, изнашивании, смазке и взаимодействии контактирующих поверхностей при их взаимном перемещении [21].

Методика определения триботехнических свойств заключается в испытании образца на износ, скорость изнашивания и интенсивность изнашивания, для выявления следующий показателей: износостойкость; несущую способность при трении; антифрикционность; фрикционную термостойкость; прирабатываемость; геометрические, технические и физико-химические характеристики приповерхностного слоя; совместимость при трении; энергетические потери в трибосопряжении.

В соответствии с [22] для изделия, полученные методом 3d-печати из PLA, исследовались на истирание (износ).

Для изготовления образцов применялся 3d-печатик Bestilament, материал – PLA, диаметр филамента – 1,75 мм, цвет – зеленый, рекомендованные параметры печати – температура нагреваемого стола 50-60°C, температура сопла 190-210°C.

Размеры образцов для испытаний: ширина 30 мм, длина 37 мм, толщина 5 мм.

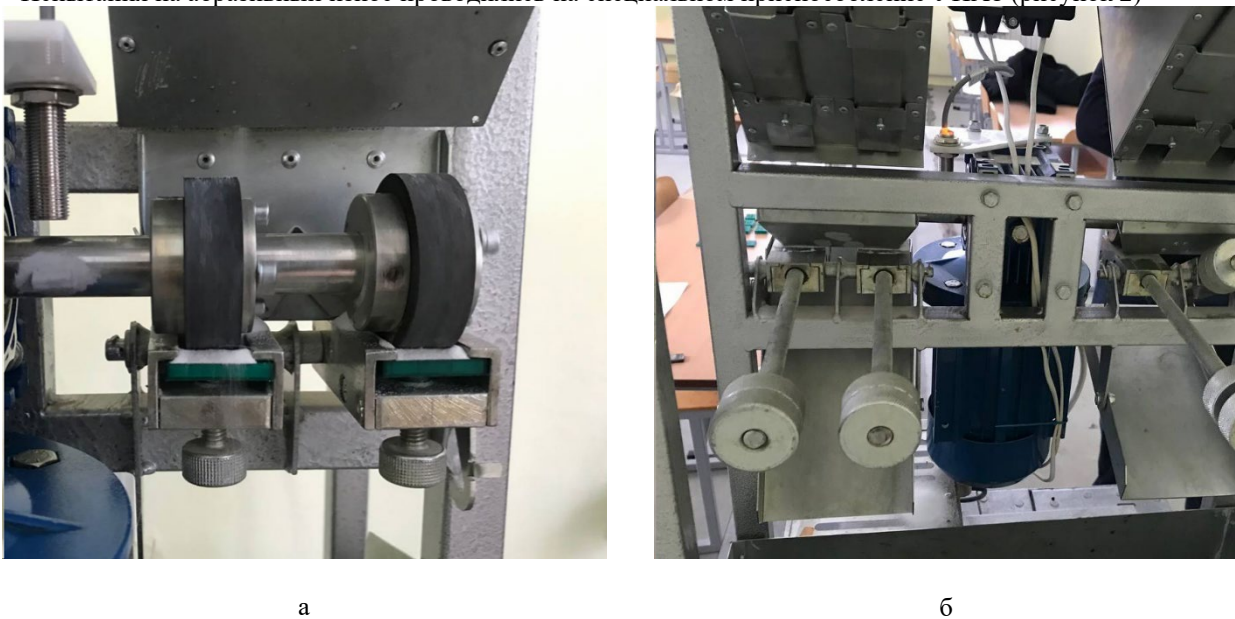
Образцы для проведения испытаний изготавливались в трех экземплярах на 3d-принтере Flash Forge Guider PIS с толщиной сопла 0,4 мм, форма заполнения – шестигранник, коэффициент заполнения 10%, температура нагреваемого стола 55°C.

Образцы представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Образцы для испытаний

Испытания на абразивный износ проводились на специальном приспособление УИАЗ (рисунок 2)



а

б

Рисунок 2 – Специальном приспособление УИАЗ
а – вид спереди; б – вид сзади

Схема проведения испытаний представлена на рисунке 3.

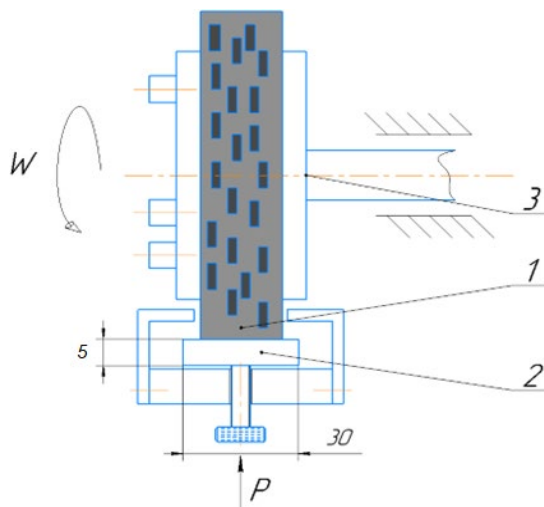


Рисунок 3 – Схема закрепления образца и приложения силы в специальном приспособление УИАЗ
1 – образец, 2 – держатель, 3 – вал

При проведении испытаний образец устанавливался в приспособление и плотно прижимался винтом к валу 1, на вал постоянным потоком подавался абразивным материалом. Усилие прижатия образца 2 к валу 1 составляло 15Н, длительность испытания 210 оборотов вала, частота вращения вала 70 об/мин, диаметр вала 50 мм.

Величина износа рассчитывалась исходя из потери массы образца после испытания. Для измерения массы использовались аналитические весы с точностью 0,01 г.

Потеря массы $\delta_m, \%$ для образцов рассчитывалась по формуле 1.

$$\delta_m = (m_{cp} - m_{cp}^*) 100\% / m_{cp} \quad (1)$$

где m_{cp}^* – средняя масса образцов после испытаний, г;
 m_{cp} – средняя масса образцов до испытаний, г.

Результаты исследований и их обсуждение.

На рисунке 4 представлены образцы после испытаний.



Рисунок 4 – Эталонный образец и образцы после испытания

На образцах после испытаний отчетливо виден износ и пятно контакта.

В таблице 1 представлены результаты экспериментальных исследований влияния температуры сопла, в пределах варьирования от 190 до 210 на потерю массы исследуемых образцов при абразивном износе на специальном приспособление УИАЗ.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований

Температура сопла, °С	Масса образца до истирания	Средняя масса образцов после испытаний	Масса образца после истирания	Средняя масса образцов до испытаний	Потеря массы
	$m_i^*, \text{г}$	$m_{cp}^*, \text{г}$	$m_i, \text{г}$	$m_{cp}, \text{г}$	
190	2,83	2,8333	-	2,8	1,176
	2,84		2,81		
	2,83		2,79		
200	2,85	2,8467	-	2,825	0,762
	2,85		2,83		
	2,84		2,82		
210	2,90	2,91	-	2,86	1,718
	2,93		2,88		
	2,90		2,84		

Из таблицы 1 видно, что минимальное значение потери массы $\delta_m, \%$ наблюдаются при температурах сопла 200°С, а на границе интервалов варьирования при температурах 190 и 210 °С наблюдается значительный рост

потерь массы. Столь существенное влияние температуры сопла на потерю массы образцов в результате износа может быть обусловлено ухудшением адгезии при выходе за пределы оптимальных параметров печати [2, 3].

Заключение. Полученные экспериментальные данные отражают зависимость потери массы $\delta_m, \%$ образцов, полученных методом 3d-печати из PLA, в результате их абразивного истирания от температуры сопла, в пределах варьирования от 190 до 210°C.

Минимальное значение потери массы $\delta_m, \%$ наблюдаются при температурах сопла 200 °С, при этом с повышением или повышением температуры на 10 °С, потери массы увеличиваются в 2,25 и 1,54 раза, соответственно, что свидетельствует о высокой степени зависимости показателей изнашивания от данного технологического параметра печати.

Полученные результаты и выводы могут быть использованы для углубления и корректировки существующих теоретических моделей, описывающих процессы 3d-печати, а также в промышленности при проектировании изделий, производимых 3d-печатью из PLA.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Савченя, А.А. Исследование влияния технологических параметров 3D-печати PLA пластиком на механические характеристики изделий / А.А. Савченя, А.И. Ермаков // *Мировая экономика и бизнесадминистрирование малых и средних предприятий: материалы 16-го Международного научного семинара, проводимого в рамках 18-ой Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике»* 26 марта 2020 года, Минск, Республика Беларусь. – Минск: Право и экономика, 2020. – С. 231–232.
2. Ермаков, А.И. Перспективы использования в пищевом оборудовании деталей, сделанных посредством 3D – печати из ABS / А.И. Ермакова, В.М. Поздняков, В.В. Литвяк, Ю.Ф. Росляков / *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология.* - 2022. - № 5. - С.54-58.
3. Ермакова, В.А. Исследование прочностных характеристик изделий, полученных методом 3-D печати из PLA Минск / В.А. Ермакова, Е.В. Гасперович, А.И. Ермаков, В.В. Литвяк / *Международный научно-технический журнал «Наука и техника»*, т.2, №2 (2022), с.107-113.
4. Валетов, В.А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы): учеб. пособие / В.А Валетов. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2015 г. – 63 с.
5. Малевич, Д.М. Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь / Д.М. Малевич // *Стратегические направления социально-экономического и финансового обеспечения развития национальной экономики: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 27–28 сент. 2018 г.* / редкол.: В.В. Пузиков [и др.]. – Минск, 2018. – С. 275–276. 3.
6. Ермаков, А.И. Утилизация тары и упаковки: учеб.-метод. пособие / А.И. Ермаков. – Минск: БНТУ, 2017. – 194 с.
7. Третьякова, А.А. Кукуруза как основное сырьё для производства PLA-пластика / Третьякова А.А., Ермакова В.А., Ермаков А.И. / *5 Международная научно-практическая конференция «Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции»*, Минск, 25–26 марта 2021 г.: БГАТУ, 2021. – С.74–76.
8. Третьякова, А.А. Влияние температурных режимов 3d-печати на характеристики изделия / А.А. Третьякова, А.И. Ермаков // *Мировая экономика и бизнес-администрирование малых и средних предприятий: материалы 17-го Международного научного семинара, проводимого в рамках 19-й международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике»*, 25–26 марта 2021 года, Минск, Республика Беларусь. – Минск: Право и экономика, 2021. – 213 с.
9. Ермаков, А.И. Прочностные характеристики изделий, получаемых 3D- печатью из ABS / А.И. Ермаков, Е.В. Гасперович, В.А. Ермакова, В.М. Поздняков // *Перспективы евразийской экономической интеграции: материалы 18-го международного научного семинара, проводимого в рамках 20-ой между. научно - технической конференции «Наука – образованию производству, экономике»*, Минск, 16-17 марта 2022 г. / *Четыре четверти – Минск, 2022.* – С. 253–256.
10. Zalohin, M. Yu. Experimental determination and comparative analysis of the PPH030GP, ABS and PLA polymer strength characteristics at different strain rates / Zalohin M. Yu., V. V. Skliarov, Ja. S. Dovzhenko, D. A. Brega / *Наукаитехника.* – Т. 18, № 3 (2019). – С. 233–239. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-233-239>.
11. Cantrell J. Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts / J. Cantrell / *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics, Proceedings of the 2016 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics*, 3, 89–105. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41600-7_11.
12. Galeta, T. Influence of structure on mechanical properties of 3D-printed objects / T. Galeta, P. Raos, J. Stojšić, I. Pakši / *Procedia Engineering*, 149 (2016), P 100–104. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.644>.
13. Rankouhi, B. Failure analysis and mechanical characterization of 3D-printed ABS with respect to layer thickness and orientation / B. Rankouhi, S. Javadpour, F. Delfanian, T. Letcher / *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 16 (3), 2016, P. 467–481. <https://doi.org/10.1007/s11668-016-0113-2>.
14. Mohamed, O.A. Effect of process parameters on dynamic mechanical performance of FDM PC/ABS printed parts through design of experiment / O.A. Mohamed, S.H. Masood, J.L. Bhowmik, M. Nikzad, J. Azadmanjiri / *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25 (7), 2016, P. 2922–2935. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2157-6>.
15. Ермаков, А.И. Применение 3D-печати в кондитерском производстве / А.И. Ермаков, С.В. Чайко / *НАУКА –ОБРАЗОВАНИЮ, ПРОИЗВОДСТВУ, ЭКОНОМИКЕ: Материалы 15-й Международной научно-*

технической конференции (70-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ) в 4 томах, Минск, май 2017 г. / БНТУ. – Минск, 2017. – Том 4. – С. 503.

16. Ермаков, А.И. Разработка 3d-принтера для образовательных учреждений / А.И. Ермаков, В.В. Книга, Е.П. Мелешня, А.А. Третьякова // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции: сборник статей III международной научно-практической конференции, Минск, 23–24 марта 2017 г. / БГАТУ; редкол.: В.Я. Груданов [и др.]. – Минск, 2017. – С. 426–428.

17. Ермаков, А.И. Применение 3D-печати в кондитерском производстве / А.И. Ермаков, С.В. Чайко / НАУКА – ОБРАЗОВАНИЮ, ПРОИЗВОДСТВУ, ЭКОНОМИКЕ: Материалы 15-й Международной научно-технической конференции (70-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ) в 4 томах, Минск, май 2017г. / БНТУ. – Минск, 2017. – Том 4 – С.506

18. Ермаков, А.И. Разработка конструкции 3d- принтера, печатающего пищевыми материалами / А.И. Ермаков, С.В. Чайко// Мировая экономика и бизнес-администрирование малых и средних предприятий: материалы 13-го междунар. науч. семинара, проводимого в рамках 15-ой между. научно-технической конференции «Наука– образованию производству, экономике, Минск, 26–28 января 2017 г. / БНТУ; редкол.: Б.М. Хрусталёв [и др.]. – Минск, 2017. – С. 255–256.

19. Шмелёв, А.В. Экспериментальное и расчетное определение механических характеристик образцов АБС-пластика при растяжении, изготовленных методом 3d-печати / А.В. Шмелёв, В.И. Ивченко, А.В. Талалуев / Инженерный журнал: наука и инновации, 2021, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-4-2070>.

20. Балашов, А.В. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью / А.В. Балашов, М.И. Маркова / Инженерный вестник Дона, 2019, №1 <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-struktury-i-svoystv-izdeliy-poluchennyh-3d-pechatyu/viewer>.

21. Машков, Ю. К. Трибофизика конструкционных материалов : учеб. пособие / Ю. К. Машков, О. В. Малий // Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2017 – 176 с. ISBN 978-5-8149-2439-1

22. ГОСТ 11012-2017. Пластмассы. Метод испытания на абразивный износ// Электронный фонд [Электронный ресурс]. – 2022. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293744/4293744275.pdf>. – Дата доступа: 09.03.2023.

УДК 514.74

НАХОЖДЕНИЕ В ДЕКАРТОВЫХ КООРДИНАТАХ УРАВНЕНИЙ ПЛОСКИХ КРИВЫХ ПО ЗАДАННОЙ ЛИНЕЙНОЙ КРИВИЗНЕ

В.Н. Жуковец, БНТУ, г. Минск

Резюме. Приведено решение задачи нахождения уравнений плоских кривых в декартовых координатах, согласно заданной кривизне в виде линейной функции. В результате решения системы дифференциальных уравнений первого порядка получены выражения, которые представлены в параметрическом виде. Описанная в статье методика может применяться при решении задач геометрии, теоретической и прикладной механики.

Ключевые слова: дифференциальная геометрия, плоские кривые, дифференциальные уравнения, теоретическая и прикладная механика.

Введение. Ранее, в работе [1], была дана методика построения плоской линии, когда задано линейное выражение для изменения радиуса кривизны в декартовой системе координат. Развивая упомянутую методику, следует получить решение другой задачи, когда задан линейный закон изменения кривизны плоской линии. Так как радиус кривизны и кривизна линии являются взаимно обратными величинами, то можно рассматривать два типа задач построения плоских кривых: по линейному закону радиуса кривизны и по линейному закону кривизны. В работе [1] рассмотрена задача первого типа, а в этой статье дано решение задачи второго типа.

Основная часть. Известно [2, 3], что в декартовых координатах кривизна линии находится как:

$$K = \frac{|y''_{xx}|}{3 \sqrt{1 + (y'_x)^2}}. \quad (1)$$

Решение дифференциального уравнения (1) описывается лишь для нескольких частных случаев [4]. Эта задача дифференциальной геометрии может быть решена для гораздо большего перечня условий, если использовать в качестве основы методику, описанную в публикации [1]. Таким образом:

$$\begin{cases} K \cdot \frac{dx}{d\psi} = \cos \psi; \\ K \cdot \frac{dy}{d\psi} = -\sin \psi. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь K – кривизна плоской линии в декартовых координатах, ψ – угол поворота нормали в радианах по часовой стрелке от оси ординат Oy , либо от ей параллельной оси. Линейный закон изменения кривизны: