

Таблица 2 – Уравнения регрессии для шликерных покрытий легированных составом TaB+MoB+B₄C.

Нагрузка, Н	Уравнения регрессии	Интенсивность изнашивания
30	$Y_3 = 0,41X_1 + 0,52X_2 + 0,38X_3 + 0,135X_1X_2 + 0,27X_1X_3 - 0,023X_2X_3 - 1,85X_1X_2(X_1 - X_2) + 0,405X_1X_3(X_1 - X_3) - 2,003X_2X_3(X_2 - X_3) + 11,7X_1X_2X_3$	0,337
50	$Y_5 = 0,44X_1 + 0,56X_2 + 0,6X_3 + 0,473X_1X_2 + 0,405X_1X_3 + 0,225X_2X_3 - 0,877X_1X_2(X_1 - X_2) - 0,18X_1X_3(X_1 - X_3) + 0,36X_2X_3(X_2 - X_3) + 10,17X_1X_2X_3$	0,518
70	$Y_7 = 0,87X_1 + 0,92X_2 + 0,64X_3 - 0,99X_1X_2 - 0,0675X_1X_3 + 0,045X_2X_3 - 0,36X_1X_2(X_1 - X_2) + 0,158X_1X_3(X_1 - X_3) - 0,63X_2X_3(X_2 - X_3) + 11,88X_1X_2X_3$	0,64
Микротвердость, ГПа	$Y = H_{\mu} = 12,14X_1 + 9,67X_2 + 8,04X_3 - 0,3X_1X_2 + 1,8X_1X_3 + 0,54X_2X_3$	H _μ max = 12,14

Анализируя данные, представленные в таблице 1, можно увидеть следующую зависимость, показывающую, что интенсивность изнашивания зависит от параметров лазерной обработки, и, увеличивая нагрузку на образец, можно добиться ее возрастания.

Заключение. Оптимальным составом, обеспечивающим минимальную интенсивность изнашивания шликерных покрытий, является состав, включающий в себя 2/3 B₄C и 1/3 TaB. Твердость и интенсивность изнашивания шликерных покрытий после лазерного легирования не строго коррелируют между собой. Упрочнение покрытий происходит за счет упрочнения матрицы, а также роста количества карбидо-боридной фазы. Лазерное оплавление с дополнительным легированием шликерных порошковых покрытий уменьшает их износ, повышая тем самым срок службы изготовленных и восстановленных деталей. Лазерное оплавление с дополнительным легированием шликерных порошковых покрытий уменьшает их износ, повышая тем самым срок службы изготовленных и восстановленных деталей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Yilbas B.S., Patel F., Karatas C. (2013): *Laser controlled melting of HSLA steel surface with presence of B₄C particles.* - Appl. Surf. Sci. - vol.282, pp.601-606.
2. P. Fauchais, A. Vardelle, in: H.S. Jazi (Ed.), *Advanced Plasma Spray Applications*, In Tech, Rijeka 2012, pp. 3–38.
3. C.T. Kwok (Ed.), *Laser surface modification of alloys for erosion and corrosion resistance*, Wood head Publishing Ltd, Cambridge, 2012
4. Feldshtein E.E., Kardapolava M.A. and Dyachenko O.V. (2015): *Microstructure and phase composition of Fe- based self-fluxing alloy coatings formed by laser remelting and superficially modified by laser alloying with B₄C particulates.* - Kovove Materialy = Metal. Mater. - vol.53, No.3, pp. 155-159.
5. Kang, J-J., Wang, C-B., Wang, H-D., Xu, B-S., Liu, J-J. and Li, G-L. (2010) ‘*Microstructure and tribological properties of composite FeCrBSi/FeS layer*’, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 224, No. 8, pp. 807–813.
6. Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: Учебное пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюрков / Под ред. А.Г. Григорьянца–М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2006.– 664 с.
7. J.A. Cornell, *Experiments with Mixtures: Designs, Models, and the Analysis of Mixture Data*, Third Ed John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.
8. Feldshtein E.E., Kardapolava M.A. and Dyachenko O.V. (2015) *Structure, phases and tribological behaviour of Fe-based self-fluxing alloy coatings formed by plasma spraying and follow-up flame and laser remelting* - *Int. J. Surface Science and Engineering*, Vol. 9, No. 5, 2015, pp. 395 – 406.

УДК 662.668

ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ 3D-ПЕЧАТЬЮ ИЗ ABS

канд. техн. наук, доцент **А. И. Ермаков**, магистрант **Е. В. Гасперович**, **В. А. Ермакова**, ФММП БНТУ, г. Минск; канд. техн. наук **В. М. Поздняков**, ФПБ, г. Минск, доктор техн. наук **А. В. Иванов**, ООО «ARTELELECTRONICS», Республика Узбекистан, г.Ташкент

Резюме – характерной чертой современного машиностроительного производства является нацеленность на снижение металлоемкости изделий, путем замены дорогостоящих металлов и сплавов на пластики [1, 2]. При этом в ходе проектирования и разработки стремятся не только снизить стоимость и массу изделий, но и сохранить или повысить их надежность и долговечность. В тоже время в промышленности возрастает интерес к внедрению безотходных технологий, таких как 3d-печать [3-5]. Одними из наиболее распространенных пластиков для 3d-печати являются ABS и PLA. К основному недостатку изделий из PLA необходимо отнести резкое снижение прочности, сопровождающееся пластическими деформациями, при нагревании выше 50°C [6, 7]. Изделия из ABS такого недостатка не имеют, что делает их более перспективными для практического использования в промышленной сфере [8, 9]. В работе приведены данные о влиянии коэффициента заполнения образцов, в пределах варьирования от 10 до 40%, и температуры сопла, в пределах варьирования от 210 до 240°C на условный предел текучести $\sigma_{рту}$, МПа.

Ключевые слова: 3D-печать, ABS, PLA, технология, механические характеристики, условный предел текучести, коэффициент заполнения, сопло, температура печати.

Введение. Основная задача современного машиностроения – повышение надежности и долговечности деталей и узлов механизмов наряду со снижением металлоемкости конструкций. Актуальность проблемы постоянно возрастает в связи с повышением требований к изготовлению изделий, необходимостью экономии дефицитных дорогостоящих металлов и сплавов и, как следствие, замены их на экономически более выгодные варианты [1, 2]. Одним из перспективных материалов для замены является акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), широко применяемый в 3d-печати [3-12]. В частности, изделия из ABS применяют в конструкциях 3d-принтеров, в качестве корпусных деталей и опорных элементов, используются в кондитерском производстве, в качестве мастер-моделей для изготовления силиконовых форм для отливки шоколада [13-16]. Но до настоящего времени в открытых информационных источниках недостаточно даны механические характеристики таких изделий и влияния параметров печати на эти характеристики. Устранение данного пробела необходимо для возможности прогнозирования на первоначальных этапах проектирования свойства изделий [6–12]. Поэтому исследования влияния параметров печати на механические характеристики изделий актуальны и представляют научный и практический интерес [6, 7].

Основная часть. Материалы и методы. Анализ информационных источников [1, 2, 6-12] позволил выделить в качестве основных факторов влияющих на механические характеристики изделий полученных 3d-печатью пластиками следующие: температура сопла, коэффициент заполнения, форма заполнения, скорость печати, толщина сопла, температура столика. При проведении экспериментальных исследований применяли пластик для 3d-печати Bestfilament, материал – ABS, диаметр филамента – 1,75 мм, цвет – белый, рекомендованные параметры печати – температура нагреваемого стола 110°C, температура сопла 215-235°C. Образцы изготавливались в трех экземплярах на 3d-принтере FlashForge Guider IIS с толщиной сопла 0,4 мм, форма заполнения – шестигранник, температура нагреваемого стола 110°C.

Размеры образцов для испытаний представлены на рисунке 1. Толщина образца 4 мм.

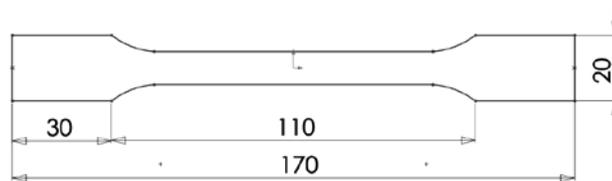


Рисунок 1 – Размер образцов для испытаний, мм

Скорости печати и толщины слоев фиксировались исходя из рекомендаций программы-слайсера FlashPrint для изделий из ABS, качество печати standard: толщина первого слоя – 0,27 мм, толщина слоев – 0,18 мм, скорость печати – 60 мм/с, скорость перемещения сопла – 80 мм/с. Испытания образцов на разрыв проводились на гидравлической разрывной машине с измерительным программным комплексом в комплекте Kason WAW-300, где образец подвергался растягивающим усилиям до разрушения. Определение прочности образца при растяжении проводилось согласно ГОСТ 11262-80 [17]. Перед испытаниями замерялись ширина и толщина образцов в рабочей части с точностью до 0,01 мм в трех местах и вычислялись площадь поперечного сечения. В расчет принимали наименьшую площадь поперечного сечения. Перед испытаниями на образцы наносились необходимые метки (без повреждения образцов), ограничивающие его базу и положение кромок захватов. Образцы закреплялись в зажимы испытательной машины по меткам, определяющим положение кромок зажимов, таким образом, чтобы продольные оси зажимов и ось образца совпадали между собой и с направлением движения подвижного зажима. Зажимы затягивались равномерно, чтобы не было проскальзывания образца в процессе испытания, но при этом не происходило его разрушение в месте закрепления. Затем образцы нагружались возрастающей нагрузкой, скорости раздвижения зажимов составила 5 мм/мин при определении прочности и относительного остаточного удлинения. В момент разрушения фиксировалось усилие. Испытания были проведены при температуре 23±2°C. Выходные характеристики определялись по графику «Нагрузка-Удлинение» [17], основной из которых являлся условный предел текучести σ_{pT} , МПа. В таблице 1 представлены результаты экспериментальных исследований влияния коэффициента заполнения образцов, в пределах варьирования от 10 до 40%, и температуры сопла, в пределах варьирования от 210 до 240°C на условный предел текучести σ_{pT} , МПа

Таблица 1 – Среднее значение условного предела текучести σ_{pT} , МПа

Температура сопла, °C	Коэффициент заполнения, %			
	10	20	30	40
210	15,71	17,39	18,02	18,94
220	17,63	18,09	18,51	19,02
230	17,06	18,21	18,49	19,12
240	16,37	17,41	19,75	20,52

Проанализирует более детально данные представленные в таблице 1. Для этого рассмотрим графические зависимости, построенные на их основе (рисунок 2 и 3).

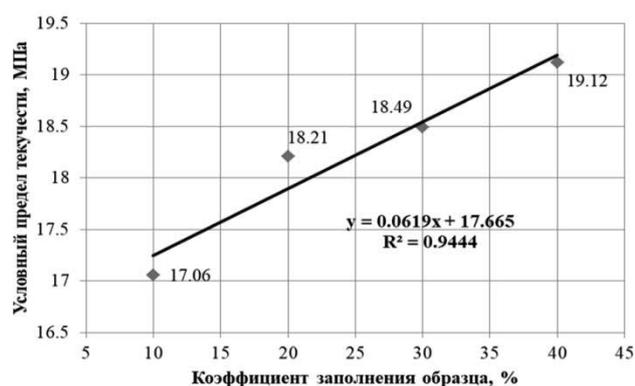


Рисунок 2 – Зависимость изменения условного предела текучести $\sigma_{\text{рту}}$, МПа при постоянной температуре сопла 230 °C

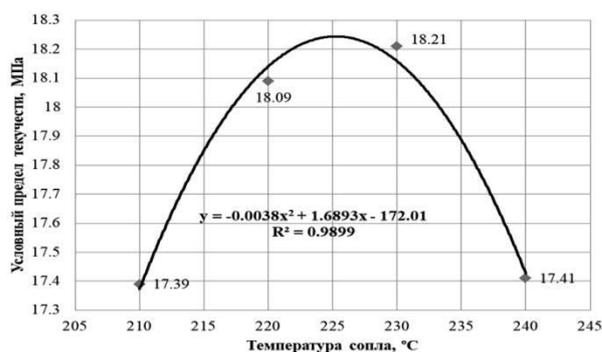


Рисунок 3 – Зависимость изменения условного предела текучести $\sigma_{\text{рту}}$, МПа при постоянном коэффициенте заполнения 20%

Из рисунка 2 видно, что с ростом коэффициента заполнения условный предел текучести $\sigma_{\text{рту}}$, МПа увеличивается, причем увеличение носит линейный характер: при увеличении коэффициента заполнения на 30% (с 10 до 40%) условный предел текучести $\sigma_{\text{рту}}$, МПа увеличивается на 12,08% или 2,06МПа. Зависимость условный предел текучести $\sigma_{\text{рту}}$, МПа от температуры сопла (рисунок 3) имеет явно выраженный экстремум, что может быть обусловлено ухудшением адгезии при выходе за пределы оптимальных параметров печати [6, 7]. Минимальные значения условного предела текучести наблюдаются при температурах сопла 210 и 240°C, а максимум достигается в интервале температур 220–230°C. Варьирование температуры сопла позволяет повысить прочностные характеристики на 4,7%. Представление на графиках (рисунок 2 и 3) регрессионные зависимости воспроизводимы и способны описывать влияние входных параметров, в пределах их варьирования, на условного предела текучести $\sigma_{\text{рту}}$, МПа, о чем свидетельствует высокое значение коэффициента детерминации R^2 , превышающее 0,93. Следует также отметить, что значение условного предела текучести $\sigma_{\text{рту}}$, МПа для образцов из ABS на 5-8% ниже, чем у PLA, которые приведены в работах [6, 7].

Заключение. Полученные экспериментальные данные отражают зависимости механических характеристик изделий, полученных методом 3d-печати из ABS, от коэффициента заполнения и температуры сопла:

1) влияние коэффициента заполнения образцов, в пределах варьирования от 10 до 40%, на условный предел текучести носит линейный характер, при этом, с увеличением коэффициента заполнения с 10 до 40% условный предел текучести $\sigma_{\text{рту}}$, МПа увеличивается на 12,08% или 2,06МПа;

2) зависимость условного предела текучести от изменения температуры сопла, в пределах варьирования от 210 до 240°C, имеет явно выраженный экстремум, достигающий максимум в интервале температур от 220 до 230°C, значение условного предела текучести в данном диапазоне на 4,7% выше, чем в крайних точках интервала варьирования.

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-печатию из ABS.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении: учеб.пособие / М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина. – СПб.: Издательство политехнического университета, 2013 г. – 222 с.
2. 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.
3. Валетов, В.А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы): учеб.пособие / В.А Валетов. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2015 г. – 63 с.
4. 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. Пузииков [и др.]. – Минск, 2018. – С. 275–276. 3.
5. Ермаков, А.И. Утилизация тары и упаковки: учеб.-метод. пособие / А.И. Ермаков. – Минск: БНТУ, 2017. – 194 с.

6. 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.
7. Третьякова, А.А. Влияние температурных режимов 3д-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.
8. 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>.
9. 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.
10. 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>.
11. 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>.
12. 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>.
13. 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.
14. Ермаков, А.И. Разработка 3d-принтера для образовательных учреждений / А.И. Ермаков, В.В. Книга, Е.П. Мелещеня, 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.
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 2017г. / БНТУ. – Минск, 2017. – Том 4 – С.506
16. 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.
17. ГОСТ 11262-80. Пластмассы. Метод испытания на растяжение (с Изменением N 1) // Электронный фонд [Электронный ресурс]. – 2005. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-11262-80>. – Дата доступа: 01.04.2021.
18. Ермакова В.А., Гасперович Е.В., Ермаков А.И., Литвяк В.В. Исследование прочностных характеристик изделий, полученных методом 3D-печати из PLA. НАУКА и ТЕХНИКА. 2022;21(2):107-113. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-107-113>

УДК 514.74

ПОСТРОЕНИЕ ПЛОСКИХ ЛИНИЙ ПО ЗАДАННОМУ В ДЕКАРТОВЫХ КООРДИНАТАХ ЗАКОНУ ПЕРЕМЕННОЙ КРИВИЗНЫ

В.Н. Жуковец, ФММП БНТУ, г. Минск

Резюме - выполнено аналитическое решение задачи построения плоских линий по заданному закону кривизны в декартовых координатах. Полученные функции представлены в параметрической форме как результат решения системы дифференциальных уравнений. Разработанный метод может быть применен для решения задач дифференциальной геометрии, теоретической механики, в системах автоматизированного проектирования.

Ключевые слова: дифференциальная геометрия, кривизна плоских линий, дифференциальные уравнения, автоматизированное проектирование.