

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНО-КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ

М. В. АБРАМЧУК, В. М. МЕДУНЕЦКИЙ, С. Ю. ПЕРЕПЕЛКИНА, Д. Г. СУРИКОВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: vm57med@yandex.ru*

Представлен краткий обзор конструкционных полимерно-композиционных материалов с указанием их основных свойств. Отмечено, что данные материалы целесообразно использовать в мелкосерийном производстве при изготовлении изделий сложной формы, в частности зубчатых передач со сложной конфигурацией зубчатых венцов. Приведены результаты экспериментальных исследований конструкционных полимерных материалов по характеристикам трения и пределу прочности на разрыв, которые проводились на универсальной машине трения MTU-1 и на машине SHIMAZU AGS-500X. Образцы деталей из полимеров были изготовлены с использованием технологии FDM. Приведены графики, отражающие зависимость коэффициента трения и предела прочности на разрыв от коэффициента заполнения образцов из полимеров, что необходимо учитывать при проектировании и изготовлении деталей.

Ключевые слова: конструкционные полимерные материалы, коэффициент трения, прочность на разрыв

Современная инженерная практика показывает, что конструкционные полимерные материалы достаточно широко применяются в различных областях техники [1]. В частности, в настоящее время наблюдается устойчивая тенденция к использованию конструкционных полимерных композиционных материалов (ПКМ) для изготовления зубчатых передач, применяемых в механических, электромеханических и мехатронных устройствах различного назначения. Такие материалы рекомендуется использовать для изготовления изделий, в том числе, сложной формы для достижения их требуемых характеристик в процессе эксплуатации, а также при изготовлении деталей сложной формы в опытном, индивидуальном и мелкосерийном производстве.

Преимущества и недостатки композитных и пластмассовых деталей достаточно хорошо известны [2—5]. Так, в некоторых случаях использование полимеров позволяет в целом повысить прочность и надежность изделий, что напрямую влияет на их стоимость [6—10]; практика использования полимеров в механизмах показала, что эти материалы более устойчивы к коррозии, а также обеспечивают снижение шума.

Таким образом, возникает объективная необходимость анализа существующих и применяемых на практике конструкционных полимерных материалов, а также изучения их свойств.

Композиционные материалы (композиты) — это материалы, которые обычно содержат основу — пластиковую матрицу и наполнитель, обладающий высокой прочностью и жесткостью.

Наполнитель и основа должны быть химически инертны друг к другу. Широкий спектр материалов с требуемым набором свойств можно получить, варьируя состав матрицы и наполнителя, их соотношение и ориентацию наполнителя. Композиты с полимерной матрицей — один из многочисленных и разнообразных типов материалов. ПКМ с низкой плотностью обладают высокими физико-механическими характеристиками. В частности, коэффициент теплового расширения полимерных композитов значительно ниже, чем металлов и простых полимеров. Это позволяет использовать изделия из ПКМ в широком диапазоне температур.

Многообразие полимерно-композиционных материалов привело к созданию различных баз данных и программ для их моделирования [11—14]. Подбирая наполнители, смолы, используя разные компоновки или схемы намотки, можно создавать материалы для разных условий эксплуатации.

Отмечено, что для изготовления зубчатых венцов сложнопрофильных цилиндрических колес используются полимерные материалы с различными технологическими, физико-механическими, трибологическими и химическими свойствами. Например, существуют такие материалы, как полиамид и его разновидность — полиамид 6, более известный как капролон, и фторопласт, как чистый, так и с различными наполнителями. Полиамиды обладают высокой прочностью, твердостью, эластичностью, износостойкостью и термостойкостью.

Капролон можно рекомендовать для изготовления деталей сложной формы в мелкосерийном производстве, так как он имеет высокий предел прочности на разрыв. Этот материал характеризуется низким коэффициентом трения в паре с любыми металлами. Он также хорошо и быстро обкатывается и в 6—7 раз легче бронзы и стали. Кроме того, капролон обладает высокой технологичностью. Известны также композиционные материалы на его основе: стеклонанополненные и минеральные.

Второй достаточно распространенный полимер — фторопласт. Фторопласт имеет чрезвычайно низкую поверхностную энергию, поэтому его можно использовать в качестве разделительного материала. Он устойчив к старению в нормальных условиях и обладает высокими антифрикционными свойствами, чрезвычайно низким коэффициентом трения [15]. Также широко используются составы на основе фторопластов. Введение в них различных наполнителей увеличивает износостойкость изделий, прочность, твердость и, в некоторых вариантах, эластичность [16].

Следует отметить, что преимущество композитных полимерных деталей, к примеру шестерен, перед металлическими шестернями заключается не только в пониженном уровне шума, но и в большем КПД за счет меньших потерь на трение. Из практики известно, что 3D-принтеры достаточно широко применяются для изготовления различных деталей малогабаритных механизмов. Наиболее часто используемые в этом варианте материалы для изготовления, в частности, зубчатых колес — пластмассы ABS и PLA [17]. Технология 3D-печати позволяет изготавливать детали с различной точностью и степенью заполнения внутренних слоев. Шероховатость поверхностных слоев обычно не зависит от коэффициента заполнения, поэтому представляет интерес исследование трибологических свойств трибопар после истирания поверхностных слоев.

Для учета трения поверхностей деталей из PLA-пластика с различными коэффициентами заполнения были проведены трибологические исследования на универсальной машине трения MTU-1 [18].

Конструкция машины позволяет сохранить параллельность соприкасающихся поверхностей, что повышает точность измерений. Машина устойчива к воздействию окружающей среды, например, к вибрации, электромагнитным помехам, пыли, влажности и колебаниям температуры.

Метод испытания на машине трения MTU-1 основан на относительном вращательном движении верхнего образца к нижнему неподвижному образцу со смазкой или без нее с ис-

пользованием различных схем, таких как диск к диску, сфера к кольцу и т. д. Скорость вращения верхнего образца без нагрузки регулируется до 2500 об/мин, нагрузка на образцы может варьироваться от 50 до 1000 Н.

На рис. 1 представлена зависимость максимального коэффициента трения от коэффициента заполнения (заданной пористости) исследуемых образцов.

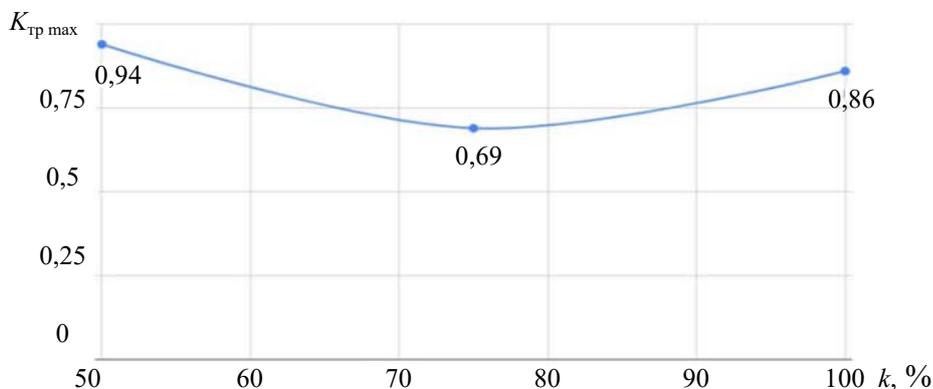


Рис. 1

Как видно из графика, наибольший максимальный коэффициент трения имеют образцы с заполнением 50 %. Возможно, это происходит из-за отсутствия равновесия поверхностного слоя и наличия пустот. При таком соотношении пор и площадей перекрытия нитей площадь контакта двух пар образцов получается неровной и максимально „пятнистой“, что увеличивает коэффициент трения. Минимальный коэффициент трения наблюдается при 75 %-ном заполнении, что можно объяснить оптимальным распределением областей с пересекающимися нитями при 3D-печати. В процессе трения поверхностный слой сглаживается за счет пластического течения полимера. Однако повышенный коэффициент трения при 75 % наблюдается при трении образцов, обработанных мелкозернистым абразивом и дихлорметаном, что происходит из-за увеличения поверхностной энергии после химической обработки. В связи с этим на поверхности создается неравновесная структура с небольшим количеством пор. По этой же причине коэффициент трения образцов со 100%-ным наполнением незначительно увеличивается, а при 50% -ном значительно снижается.

Прочностные исследования данных материалов проводились на разрывной машине SHIMAZU AGS-500X.

На рис. 2 показано соотношение между пределом прочности и коэффициентом заполнения образцов.

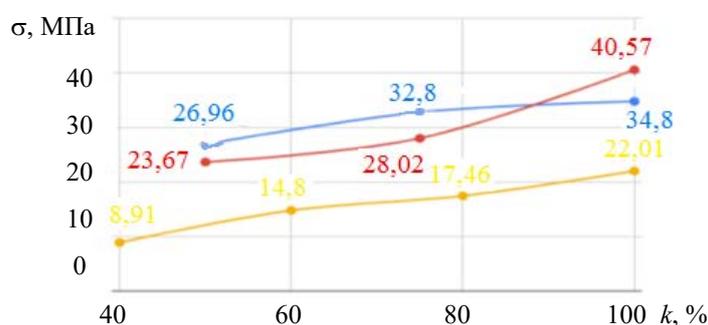


Рис. 2

Анализ графика показывает, что увеличение предела прочности прямо пропорционально увеличению коэффициента заполнения: при увеличении коэффициента k с 40 до 100 % повышается процент прочности, что обеспечивает вязкую текучесть материала, а также появляются дополнительные адгезионные молекулярные мостики.

Таким образом, рассмотренные конструкционные полимерные материалы можно рекомендовать для изготовления малогабаритных деталей механических устройств в мелкосерийном производстве. Представленные результаты исследований прочностных и трибологических характеристик образцов полимеров, полученные по технологии FDM с различными коэффициентами заполнения, следует учитывать на практике при изготовлении механических изделий различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *González-Henríquez C. M., Sarabia-Vallejos M. A., Rodríguez-Hernández J.* Polymers for additive manufacturing and 4D-printing // *Materials, Methodologies, and Biomedical Applications. Progress in Polymer Science.* 2019. N 94. P. 57—116. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2019.03.001.
2. *Ghosh R., Ghosh S., Srivastava T., Barman R. N.* Design and manufacturing of laminated spring: a new approach based on composites // *Intern. Journal of Engineering and Technology.* 2017. N 9(2). P. 1438—1451. DOI: 10.21817/ijet/2017/v9i2/170902285.
3. *Chatterjee S., Gupta K.* Advances in Modelling and Analysis C // J. Homepage: http://iicta.org/Journals/AMA/AMA_C. 2018. N 73(3). P. 79—83. DOI: 10.18280/ama_c.730301.
4. *Pawar P. B., Abhay A. Utpat.* Analysis of Composite Material Spur Gear under Static Loading Condition // *Materials Today: Proc.* 2015. N 2. P. 2968—2974. DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.278
5. *Thirugnanam A., Sathish J., Rakesh L.* Contact analysis of spur gear using composite material (NYLO CAST) // *Middle-East Journal of Scientific Research.* 2014. N 20(8). P. 966—968. DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2014.20.08.114144.
6. *Mao K., Greenwood D., Ramakrishnan R., Goodship V., Shroufi C., Chetwynd D., Langlois P.* The wear resistance improvement of fibre reinforced polymer composite gears // *Wear.* 2019. N 426. P. 1033—1039. DOI: 10.1016/j.wear.2018.12.043.
7. *Catera P. G., Mundo D., Gagliardi F., Treviso A.* A comparative analysis of adhesive bonding and interference fitting as joining technologies for hybrid metal-composite gear manufacturing // *Intern. Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM).* 2020. N 1—16. DOI: 10.1007/s12008-020-00647-y.
8. *Catera P. G., Mundo D., Treviso A., Gagliardi F., Visrolia A.* On the design and simulation of hybrid metal-composite gears // *Applied Composite Materials.* 2019. N 26(3). P. 817—833. DOI: 10.1007/s10443-018-9753-6.
9. *Gauntt S. M., Campbell R. L.* Characterization of a hybrid (steel-composite) gear with various composite materials and layups // *AIAA Scitech 2019 Forum.* 2019. Vol. 0146. DOI: 10.2514/6.2019-0146.
10. *Singh A. K., Yadav S., Singh P. K.* A Comparative Study for Transmission Efficiency of ABS, POM, and HDPE Spur Gears // *Advances in Engineering Design.* 2019. P. 269—277. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-13-6469-3_24.
11. Total Materia. Самая обширная база данных материалов в мире [Электронный ресурс]: <<https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=Home&LN=RU>>. 11.06.2021.
12. Material Data. Center Data on materials and their applications. [Электронный ресурс]: <<https://www.materialdatacenter.com/mb/>>. 11.06.2021.
13. База полимерных материалов. [Электронный ресурс]: <<https://plastinfo.ru/m-base/>>. 11.06.2021.
14. *Андреев М. В., Кражнев Ю. А., Штюк А. А.* Формирование базы данных полимерных композитов // *Инновации в машиностроении.* 2018. С. 491—497.
15. *Structure and Properties of Additive Manufactured Polymer Components / K. Friedrich, R. Walter:* Eds. Woodhead Publ., 2020. DOI: 10.1016/C2018-0-03664-6.
16. *Goh G. D., Yap Y. L., Tan H. K. J., Sing S. L., Goh G. L., Yeong W. Y.* Process-structure-properties in polymer additive manufacturing via material extrusion: A review // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences.* 2020. N 45(2). P. 113—133. DOI: 10.1080/10408436.2018.1549977.
17. *Milislavljević J., Petrović E., Ćirić I., Mančić M., Marković D., Đorđević M.* Tensile testing for different types of polymers // *Proc. 29th Danubia-Adria Symp., DAS-29, University of Belgrade, Serbia, 2012.* P. 266—269.

18. Perepelkina S., Kovalenko P., Pechenko R. Investigation of tribological properties of metallic materials with the use of the universal friction machine “MTU-1“ // *Procedia Engineering* 2017. Vol. 176. P. 301—309.

Сведения об авторах

- Михаил Владимирович Абрамчук** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: abramchukmv@itmo.ru
- Виктор Михайлович Медунецкий** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; E-mail: vm57med@yandex.ru
- Светлана Юрьевна Перепелкина** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: sker@itmo.ru
- Дмитрий Геннадьевич Суриков** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, департамент эксплуатации объектов недвижимости; начальник департамента; E-mail: surikov77@mail.ru

Поступила в редакцию
30.06.2021 г.

Ссылка для цитирования: Абрамчук М. В., Медунецкий В. М., Перепелкина С. Ю., Суриков Д. Г. Влияние структурных особенностей конструкционных полимерно-композиционных материалов на физико-механические свойства изделий // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2021. Т. 64, № 11. С. 949—954.

**INFLUENCE OF STRUCTURAL FEATURES
OF CONSTRUCTION POLYMER-COMPOSITE MATERIALS
ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF PRODUCTS**

M. V. Abramchuk, V. M. Medunetskiy, S. Yu. Perepelkina, D. G. Surikov

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: vm57med@yandex.ru

A brief overview of construction polymer-composite materials with an indication of their main properties is presented. It is noted that these materials are advisable to use in the manufacture of products of complex shapes, in particular gears with a complex configuration of gear rings. Results of experiments with structural polymer materials to study their characteristics of friction and tensile strength, carried out using the universal friction machine MTU-1 and SHIMAZU AGS-500X machine, are presented. Samples of polymer parts are made using FDM technology. Presented graphs showing dependence of the friction coefficient and ultimate tensile strength on the filling factor of polymer samples, are to be taken into account in the design and manufacture of parts.

Keywords: construction polymer materials, coefficient of friction, tensile strength

REFERENCES

- González-Henríquez C.M., Sarabia-Vallejos M.A., & Rodríguez-Hernández J. *Materials, methodologies, and biomedical applications. Progress in Polymer Science*, 2019, vol. 94, pp. 57–116, DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2019.03.001.
- Ghosh R., Ghosh S., Srivastava T., & Barman R.N. *International Journal of Engineering and Technology*, 2017, no. 2(9), pp. 1438–1451, DOI: 10.21817/ijet/2017/v9i2/170902285.
- Chatterjee S., & Gupta K. *Advances in Modelling and Analysis C*, 2018, no. 3(73), pp. 79–83, DOI: 10.18280/ama_c.730301, http://iicta.org/Journals/AMA/AMA_C.
- Pawar P.B., Utpat A.A. *Materials Today: Proceedings*, 2015, no. 2, pp. 2968–2974, DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.278.
- Thirugnanam A., Sathish J., & Rakesh L. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 2014, no. 8(20), pp. 966–968, DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2014.20.08.114144.
- Mao K., Greenwood D., Ramakrishnan R., Goodship V., Shroufi C., Chetwynd D., & Langlois P. *Wear*, 2019, vol. 426, pp. 1033–1039, DOI: 10.1016/j.wear.2018.12.043.
- Catera P.G., Mundo D., Gagliardi F., & Treviso A. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2020, pp. 1–16, DOI: 10.1007/s12008-020-00647-y.
- Catera P.G., Mundo D., Treviso A., Gagliardi F., & Visrolia A. *Applied Composite Materials*, 2019, no. 3(26), pp. 817–833, DOI: 10.1007/s10443-018-9753-6.
- Gauntt S.M., & Campbell R.L. *AIAA Scitech 2019 Forum*, 2019, pp. 0146, DOI: 10.2514/6.2019-0146.
- Singh A.K., Yadav S., & Singh P.K. *Advances in Engineering Design*, Springer, Singapore, 2019, pp. 269–277, DOI: 10.1007/978-981-13-6469-3_24.
- <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=Home&LN=RU>. (in Russ.)
- <https://www.materialdatacenter.com/mb/>.

13. <https://plastinfo.ru/m-base/>. (in Russ.)
14. Andreev M.V., Kryazhev Yu.A., Shityuk A.A. *Innovatsii v mashinostroyenii (INMASH – 2018)* (Innovations in Mechanical Engineering (INMASH - 2018)), Collection of Works of the IX International Scientific and Practical Conference, Barnaul, October 24–26, 2018. pp. 491–497. (in Russ.)
15. Friedrich K., & Walter R., ed., *Structure and Properties of Additive Manufactured Polymer Composites*, Woodhead Publishing, 2020, DOI: 10.1016/C2018-0-03664-6.
16. Goh G.D., Yap Y.L., Tan H.K.J., Sing S.L., Goh G.L., & Yeong W.Y. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2020, no. 2(45), pp. 113–133, DOI: 10.1080/10408436.2018.1549977.
17. Milisavljević J., Petrović E., Ćirić I., Mančić M., Marković D., Đorđević M. *DAS-29, 29th Danubia-Adria Symposium*, University of Belgrade, Serbia, 2012, pp. 266–269.
18. Perepelkina S., Kovalenko P., Pechenko R. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 176, pp. 301–309.

Data on authors

- Mikhail V. Abramchuk** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; E-mail: abramchukmv@itmo.ru
- Viktor M. Medunetskiy** — Dr. Sci., Professor; ITMO University; E-mail: vm57med@yandex.ru
- Svetlana Yu. Perepelkina** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; E-mail: sker@itmo.ru
- Dmitry G. Surikov** — PhD; ITMO University, Department of Real Estate Objects Operation; Head of the Department; E-mail: surikov77@mail.ru

For citation: Abramchuk M. V., Medunetskiy V. M., Perepelkina S. Yu., Surikov D. G. Influence of structural features of construction polymer-composite materials on the physical and mechanical properties of products. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 11. P. 949–954 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-11-949-954