

УДК 621.3

Влияние концентрации фуллеренов на триботехнические характеристики пленок из полиметилметакрилата при испытании по схеме «палец—диск»

Г.В. Иванова, М.А. Скотникова, М.Г. Евсин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29 литера Б,
г. Санкт-Петербург 195251, Россия

Поступила в редакцию 04.08.2025.

Проведены сравнительные физико-механические и триботехнические исследования влияния на трение скольжения различного содержания фуллеренов C_{60} в полимерных плёнках из полиметилметакрилата (ПММА) при испытании по схеме «палец—диск». Показано, что увеличение концентрации фуллеренового модификатора до 1 % приводит к снижению шероховатости поверхности на наноуровне и коэффициента трения ПММА в паре со сплавом алюминия Д16. С увеличением концентрации фуллеренов C_{60} в полимерных плёнках до 3 % происходит их коагуляция, формирование неоднородно распределённых наноконцентраторов диаметром порядка 150 нм. При этом, триботехнические характеристики полимерных плёнок ухудшаются. Коэффициент трения ПММА в паре со сплавом алюминия Д16 возрастает, по сравнению с исходным состоянием. С увеличением содержания фуллера C_{60} в полимерных плёнках, увеличиваются их плотность и микротвёрдость, появляется и однозначно усиливается бордовый цвет. При трении ПММА в исходном состоянии (без добавления C_{60}) в паре со сплавом алюминия Д16, были обнаружены, протекающие адгезионные процессы, и как следствие — перенос алюминия на полимерную плёнку с повышением коэффициента трения. Исследованные плёнки оказались неоднородными по составу и свойствам, подвергнутыми короблению, с недостаточным диспергированием материала на наноуровне.

Ключевые слова: трибологические испытания, полимерные плёнки, фуллерен C_{60} , плотность, микротвёрдость.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-494-501

Адрес для переписки:

М.А. Скотникова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул.
Политехническая, д. 29 литера Б,
г. Санкт-Петербург 195251, Россия
e-mail: skotnikova@mail.ru

Address for correspondence:

M.A. Skotnikova
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Polytechnicheskaya, 29, St. Petersburg 195251, Russia
e-mail: skotnikova@mail.ru

Для цитирования:

Г.В. Иванова, М.А. Скотникова, М.Г. Евсин.
Влияние концентрации фуллеренов на триботехнические
характеристики пленок из полиметилметакрилата при испытании
по схеме «палец—диск».
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 5. — С. 494—501.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-494-501

For citation:

G.V. Ivanova, M.A. Skotnikova, and M.G. Evsin.
[Effect of Fullerene Concentration on Tribological Characteristics of
Polymethylmethacrylate Films during Finger-Disc Testing].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 5, pp. 494—501 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-494-501

Effect of Fullerene Concentration on Tribological Characteristics of Polymethylmethacrylate Films during Finger-Disc Testing

G.V. Ivanova, M.A. Skotnikova, and M.G. Evsin

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Polytechnicheskaya, 29, St. Petersburg 195251, Russia

Received 04.08.2025.

Abstract

Comparative physical and mechanical and tribotechnical studies of the effect of various C_{60} fullerene contents in polymethylmethacrylate (PMMA) polymer films on sliding friction have been carried out during Finger-Disc testing. It is shown that an increase in the concentration of the fullerene modifier to 1 % leads to a decrease in surface roughness at the nanoscale and the coefficient of friction of PMMA paired with aluminum alloy D16. As the concentration of C_{60} fullerenes in polymer films increases to 3 %, they coagulate and form inhomogeneously distributed nano-concentrators with a diameter of about 150 nm. At the same time, the tribological properties of polymer films deteriorate. The coefficient of friction of PMMA paired with aluminum alloy D16 increases compared to the initial state. With an increase in the content of fullerene C_{60} in polymer films, their density and microhardness increase, and the burgundy color appears and unambiguously increases. When PMMA was rubbed in its initial state (without the addition of C_{60}) in combination with aluminum alloy D16, adhesive processes were detected, and as a result, aluminum was transferred to the polymer film with an increase in the coefficient of friction. The studied films turned out to be heterogeneous in composition and properties, subjected to warping, with insufficient dispersion of the material at the nanoscale.

Keywords: tribological tests, polymer films, fullerene C_{60} , density, microhardness.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-494-501

Адрес для переписки:

М.А. Скотникова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул.
Политехническая, д. 29 литера Б,
г. Санкт-Петербург 195251, Россия
e-mail: skotnikova@mail.ru

Address for correspondence:

M.A. Skotnikova
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Polytechnicheskaya, 29, St. Petersburg 195251, Russia
e-mail: skotnikova@mail.ru

Для цитирования:

Г.В. Иванова, М.А. Скотникова, М.Г. Евсин.
Влияние концентрации фуллеренов на триботехнические
характеристики пленок из полиметилметакрилата при испытании
по схеме «палец—диск».
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 5. — С. 494—501.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-494-501

For citation:

G.V. Ivanova, M.A. Skotnikova, and M.G. Evsin.
[Effect of Fullerene Concentration on Tribological Characteristics of
Polymethylmethacrylate Films during Finger-Disc Testing].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 5, pp. 494—501 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-494-501

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

элементов». — СПб. — 2009, 491—500

1. **Ayesha Kausar.** Poly (methyl methacrylate)/Fullerene Nanocomposite—Factors and Applications // Polymer-Plastics Technology and Materials. — 2022 (61), no. 6, 593—608
2. **Geim A.K. and Novoselov K.S.** The Rise of Graphene // Nature Materials. — 2007 (6), 183—191
3. **Раков Э.Г.** Нанотрубки и фуллерены. — М.: Физматкнига. — 2006
4. **Hirsch A.** Functionalization of Single-Walled Carbon Nanotubes // Angew. Chem. Int. Ed. — 2002 (41), 1853—1859
5. **Dittrich B. and Wartig K.A.** Flame Retardancy Through Carbon Nanomaterials: Carbon Black, Multiwall Nanotubes, Expanded Graphite, Multi-Layer Graphene and Graphene in Polypropylene // Polym. Degrad. Stab. — 2013 (98), 1495—1505
6. **Hattemer G.D. and Arya G.** Viscoelastic Properties of Polymer-Grafted Nanoparticle Composites from Molecular Dynamics Simulations // Macromolecules. — 2015 (48), 1240—1255
7. **Wang Z., Yang T., Wang Z., Chai G., and Zhang X.** Polymethyl Methacrylate/Carbon Nanotube Composites // Fire Sci. Technol. — 2018 (37), 655—657
8. **Meesorn W., Shirole A., Vanhecke D. et al.** A Simple and Versatile Strategy to Improve the Mechanical Properties of Polymer Nanocomposites with Cellulose Nanocrystals // Macromolecules. — 2017 (50), 2364—2374
9. **Sanz A., Wong H.C., Nedoma A.J. et al.** Influence of C₆₀ Fullerenes on the Glass Formation of Polystyrene // Polymer. — 2015 (68), 47—56
10. **Kropka J.M., Putz K.W., Pryamitsyn V. et al.** Origin of Dynamical Properties in PMMA-C₆₀ Nanocomposites // Macromolecules. — 2007 (40), 5424—5432
11. **Shilov M.A., Smirnova A.I., Gvozdev A.A. et al.** Rheology of Greases with Additives of Carbon Nanostructures of Various Types // Friction and Wear. — 2020 (40), № 6, 720—730
12. **Gabriela Lisa, Cerasela-Ionela Cleminte, and Tsuyoshi Michinobu.** Thermal Stability and Degradation Mechanism of C₆₀ Fullerene-Based Polymers // Journal of Applied Polymer Science. — 2024 (141), no. 11, e55079
13. **Богданов А.А.** Процессы агрегации фуллера C₆₀ в композитах полимер-фуллерен // Физика твердого тела. — 2020 (62), № 2, 302—306
14. **Троицкий Б.Б., Хохлова Л.В., Конец А.Н.** Температурные и концентрационные пределы для фуллеренов C₆₀ и C₇₀ как ингибиторов деструкции полимеров // Высокомолекулярные соединения А. — 2004 (46), № 9, 1541—1548
15. **Федоровский Т.Д., Гинзбург Б.М., Скотникова М.А. и др.** Экспериментальное изучение физико-механических свойств композитных пленок из полиметилметакрилата с добавками фуллера C₆₀ // Сб. трудов «Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных

References

1. **Ayesha Kausar.** Poly (methyl methacrylate)/Fullerene Nanocomposite—Factors and Applications // Polymer-Plastics Technology and Materials. — 2022 (61), no. 6, 593—608
2. **Geim A.K. and Novoselov K.S.** The Rise of Graphene // Nature Materials. — 2007 (6), 183—191
3. **Rakov E.G.** Nanotrubki i fullereny. — M.: Fizmatkniga. — 2006 (in Russian)
4. **Hirsch A.** Functionalization of Single-Walled Carbon Nanotubes // Angew. Chem. Int. Ed. — 2002 (41), 1853—1859
5. **Dittrich B. and Wartig K.A.** Flame Retardancy Through Carbon Nanomaterials: Carbon Black, Multiwall Nanotubes, Expanded Graphite, Multi-Layer Graphene and Graphene in Polypropylene // Polym. Degrad. Stab. — 2013 (98), 1495—1505
6. **Hattemer G.D. and Arya G.** Viscoelastic Properties of Polymer-Grafted Nanoparticle Composites from Molecular Dynamics Simulations // Macromolecules. — 2015 (48), 1240—1255
7. **Wang Z., Yang T., Wang Z., Chai G., and Zhang X.** Polymethyl Methacrylate/Carbon Nanotube Composites // Fire Sci. Technol. — 2018 (37), 655—657
8. **Meesorn W., Shirole A., Vanhecke D. et al.** A Simple and Versatile Strategy to Improve the Mechanical Properties of Polymer Nanocomposites with Cellulose Nanocrystals // Macromolecules. — 2017 (50), 2364—2374
9. **Sanz A., Wong H.C., Nedoma A.J. et al.** Influence of C₆₀ Fullerenes on the Glass Formation of Polystyrene // Polymer. — 2015 (68), 47—56
10. **Kropka J.M., Putz K.W., Pryamitsyn V. et al.** Origin of Dynamical Properties in PMMA-C₆₀ Nanocomposites // Macromolecules. — 2007 (40), 5424—5432
11. **Shilov M.A., Smirnova A.I., Gvozdev A.A. et al.** Rheology of Greases with Additives of Carbon Nanostructures of Various Types // Friction and Wear. — 2020 (40), № 6, 720—730
12. **Gabriela Lisa, Cerasela-Ionela Cleminte, and Tsuyoshi Michinobu.** Thermal Stability and Degradation Mechanism of C₆₀ Fullerene-Based Polymers // Journal of Applied Polymer Science. — 2024 (141), no. 11, e55079
13. **Bogdanov A.A.** Prosessy agregatsii fullerena C₆₀ v kompozitah polimer-fulleren // Fizika tverdogo tela. — 2020 (62), № 2, 302—306 (in Russian)
14. **Troitskij B.B., Hohlova L.V., Konev A.N.** Temperaturnye i kontsentratsionnye predely dlja fullerenov C₆₀ i C₇₀ kak ingibitorov destruktсии polimerov // Vysokomolekuljarnye soedinenija A. — 2004 (46), № 9, 1541—1548 (in Russian)
15. **Fedorovskij T.D., Ginzburg B.M., Skotnikova M.A. i dr.** Eksperimental'noe izuchenie fiziko-mehaničeskikh svojstv kompozitnyh plenok iz polimetilmetakrilata s dobavkami fullerena S60 //

Sb. trudov “Matematicheskoe modelirovanie v me-
hanike deformiruemykh tel i konstruksij. Metody

granichnyh i konechnyh elementov”. — SPb. —
2009, 491—500 (in Russian)

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в редакцию журнала.
Адрес редакции: 246050, ул. Кирова 32а, г. Гомель, Беларусь. Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11
Full text of articles can be purchased from the editorial office.
Address: 32a Kirov Street, Gomel, Belarus, 246050. Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11
E-mail: FWJ@tut.by