



Научная статья
05.16.09 – Материаловедение (по отраслям) (технические науки)
УДК 534-16:531.44
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.018

ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Дмитрий Анатольевич Негров ¹, Виталий Юрьевич Путинцев ²

^{1, 2} Омский государственный технический университет, Омск, Россия

¹ negrov_d_a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5713-5470>

² putintsev_vit@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2003-0819>

Аннотация. Улучшение технологии холодного прессования и получение готовых изделий с повышенными эксплуатационными свойствами из полимерных композиционных материалов является актуальной задачей современного материаловедения. В статье представлены результаты исследования влияния ультразвукового воздействия с одновременно наложенной низкочастотной амплитудной модуляцией на механические свойства и триботехнические характеристики полимерного композиционного материала на основе политетрафторэтилена, модифицированного гексагональным нитридом бора.

Установлено, что режим прессования композиционного материала с применением ультразвукового воздействия частотой 17 кГц и одновременно наложенной низкочастотной амплитудной модуляцией 100 Гц позволяет повысить механические свойства: предел прочности при растяжении на 10–18 % относительное удлинение на 11–20 %, модуль упругости на 13–19 %, твердость на 4 %.

На основании проведенных исследований триботехнических характеристик ПКМ на основе ПТФЭ модифицированных гексагональным нитридом бора 5 масс. % наблюдается снижение интенсивности массового изнашивания на 39 %, коэффициента трения – на 11 %.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, нитрид бора, низкочастотная модуляция, ультразвуковое воздействие, интенсивность массового изнашивания, коэффициент трения.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90109.

Для цитирования: Негров, Д. А., Путинцев, В. Ю. Влияние низкочастотной модуляции на механические свойства и триботехнические характеристики полимерных композиционных материалов // Ползуновский вестник. 2021. № 4. С. 140–145. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.018.

INFLUENCE OF LOW-FREQUENCY MODULATION ON MECHANICAL PROPERTIES AND TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

Dmitriy A. Negrov ¹, Vitaliy Yu. Putintsev ²

^{1,2} Omsk State Technical University, Omsk, Russia

¹ negrov_d_a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5713-5470>

² putintsev_vit@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2003-0819>

Abstract. *Improving the technology of cold pressing and obtaining finished products with increased operational properties from polymer composite materials is an urgent task of modern materials science. This article presents the results of a study of the effect of ultrasonic action with a simultaneously superimposed low-frequency amplitude modulation on the physical properties and tribotechnical characteristics of a polymer composite material based on polytetrafluoroethylene modified with hexagonal boron nitride. It has been established that the mode of pressing a composite material using ultrasonic action with a frequency of 17 kHz and simultaneously superimposed low-frequency amplitude modulation of 100 Hz allows increasing the mechanical properties: tensile strength by 10-18%, relative elongation by 11-20%, elastic modulus by 13-19%, hardness 4%. Based on the studies of the tribotechnical characteristics of PCM based on PTFE modified with hexagonal boron nitride 5 wt. % there is a decrease in the intensity of mass wear by 39%, the coefficient of friction by 11%.*

Keywords: PTFE, boron nitride, low-frequency modulation, ultrasonic action, intensity of mass wear, coefficient of friction.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 20-33-90109.

For citation: Negrov, D. A. & Putintsev, V. Yu. (2021). Influence of low-frequency modulation on mechanical properties and tribotechnical characteristics of polymer composite materials. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 140-145. (in Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.018.

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Важной областью использования ПКМ на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) являются трибологические узлы трения, вакуумные уплотнения, к которым предъявляются повышенные эксплуатационные требования, что приводит к усовершенствованию технологических параметров производства.

Выбор политетрафторэтилена обоснован высокими антифрикционными свойствами и способностью работать в узлах трения в условиях сухой смазки. Уникальные триботехнические характеристики ПТФЭ заключаются в низком коэффициенте трения (0,04–0,08) при скорости скольжения менее 0,01 м/с. При увеличении скорости скольжения коэффициент трения ПТФЭ возрастает и составляет более 0,3 [1–3]. Наиболее распространенным методом улучшения механических свойств и триботехнических характеристик является введение в полимерную матрицу наполнителей-модификаторов

различного типа (дисперсных, волокнистых, ультрадисперсных) [4–6]. В качестве наполнителя применялся нитрид бора, который существенно влияет на прочностные и пластические свойства полимерных композиционных материалов, понижает коэффициент трения и интенсивность изнашивания ПКМ, значительно улучшает эксплуатационные свойства [7–8].

Образцы изготавливались холодным прессованием. Для повышения качества прессования получили применение способы уплотнения порошков с наложением внешнего ультразвукового воздействия. Под действием акустической вибрации силы трения и сцепления частиц уменьшаются, существенно облегчается возникновение и развитие пластической деформации частиц порошка. При этом повышается равномерность укладки компонентов полимера. Предлагаемая технология прессования ПКМ с ультразвуковым воздействием и одновременно наложенной низкочастотной амплитудной модуляцией, обеспечит усиление степени взаимодействия наполнителей с полимером, новые эффекты объемного воздействия разно-

частотных акустических волн, равномерность укладки частиц полимера, уменьшит поры, разрушит арочные образования в процессе формирования ПКМ [9]. Улучшение технологии холодного прессования и получение готовых изделий с повышенными эксплуатационными свойствами из полимерных композиционных материалов является актуальной задачей современного материаловедения. Целью данной работы является исследование влияния ультразвукового воздействия с одновременно наложенной низкочастотной амплитудной модуляцией на физические свойства и триботехнические характеристики полимерного композиционного материала на основе политетрафторэтилена модифицированного гексагональным нитридом бора.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является промышленно выпускаемый политетрафторэтилен марки ПН-20, плотностью $2,16 \text{ г/см}^3$, средний размер частиц 6–20 мкм и графитоподобный гексагональный нитрид бора с содержанием 0,5; 1; 3; 5; 10 масс. %.

Методика исследования заключалась в сравнении разных технологических режимов прессования на механические свойства и триботехнические характеристики полимерного композиционного материала. Образцы для проведения исследований изготовлены по технологии холодного прессования. Предварительно проведено механическое размельчение и смешивание порошка в лабораторной мельнице с частотой вращения ножей не менее 2800 мин^{-1} . Для сравнения механических свойств и триботехнических характеристик были изготовлены образцы по трем технологическим режимам. Первый режим – традиционное прессование без внешнего энергетического воздействия (без УЗ). Второй режим заключался в воздействии ультразвуковых колебаний 17000 Гц без низкочастотной модуляции (УЗ). Третий режим – ультразвуковые колебания 17000 Гц с одновременно наложенной низкочастотной модуляцией 100 Гц (УЗ+100). Время прессования составляло 60 секунд. Образцы для исследований изготавливали на установке, состоящей из гидравлического пресса ГМС-50, модернизированного ультразвукового генератора УЗГ-6М, работающем в частотном диапазоне 17–23 кГц, магнитострикционного преобразователя ПМС-15А-18.

Термическая обработка образцов проводилась в программируемой печи СНОЛ7/10. Режим спекания образцов ПТФЭ заключался в плавном нагреве до $(360 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ со скоростью

$2 \text{ }^\circ\text{C/мин}$, выдержке заготовки полимерного композита при температуре $(360 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ из расчета 9 мин на 1 мм толщины образца, регулируемом охлаждении со скоростью $0,5 \text{ }^\circ\text{C/мин}$ до $327 \text{ }^\circ\text{C}$ и последующим охлаждением вместе с печью до комнатной температуры.

Для определения механических свойств согласно ГОСТ 11262-80 использовалась машина для испытаний Zwick Roell BT2. Модуль упругости определялся по стандартной методике ГОСТ 25.601-80.

Твердость материала определялась по Шору с помощью твердомера TBP-D (шкала D).

Определение триботехнических характеристик проводилось на машине трения УМТ-2168. Диаметр образцов $10,0 \pm 0,1 \text{ мм}$, длина $15 \pm 0,1 \text{ мм}$, контртело-стальной диск из стали марки 45 с твердостью 45–50 HRC, шероховатостью $Ra < 0,32 \text{ мкм}$. При проведении испытаний к образцам прикладывалась нормальная нагрузка -471 Н , линейная скорость скольжения составляла $-0,75 \text{ м/с}$, время испытания – 60 минут. Технологическую приработку ПКМ проводили в течение 10 минут при нагрузке 471 Н и скорости скольжения $0,75 \text{ м/с}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что у образцов, отпрессованных с ультразвуковым воздействием и низкочастотной модуляцией 100 Гц (рисунок 1, а) при содержании 5 масс. % нитрида бора достигается максимальное значение предела прочности 27 МПа, что на 11 % больше, чем у образцов, отпрессованных по традиционной технологии (рисунок 1, в). Для сравнения приведены значения, полученные после прессования с ультразвуковым воздействием без наложения низкочастотной модуляции (рисунок 1).

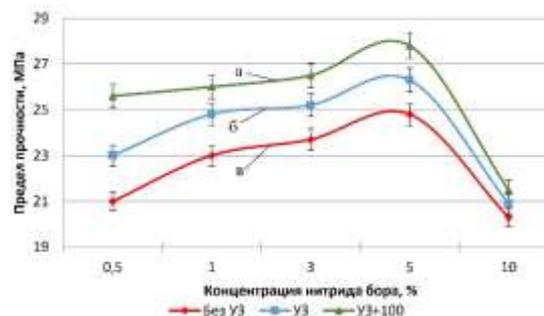


Рисунок 1 – Зависимость предела прочности от концентрации нитрида бора

Figure 1 - Dependence of ultimate strength on boron nitride concentration

Максимальное значение относительного удлинения достигается на режиме УЗ+100 (рисунок 1, а) при концентрации нитрида бора

ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

3 масс. % и составляет 520 %, дальнейшее увеличение содержания до 5 масс. % приводит к плавному уменьшению относительного удлинения (рисунок 2), до 10 масс. % к резкому уменьшению 326–360 %.

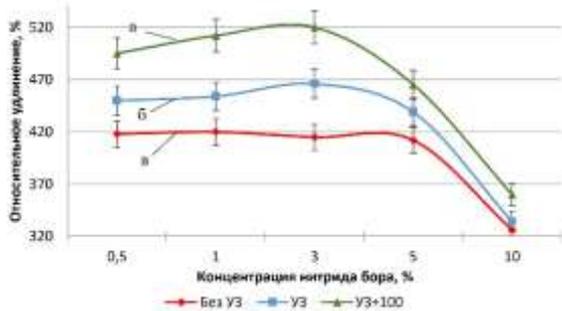


Рисунок 2 – Зависимость относительного удлинения от концентрации нитрида бора

Figure 2 - Dependence of the elongation on the concentration of boron nitride

Значения модуля упругости всех образцов представлены на рисунке 3. Максимальное значение модуля упругости достигается на режиме УЗ+100 и составляет 504 МПа – это на 19 % больше, чем у образцов, изготовленных по традиционной технологии.

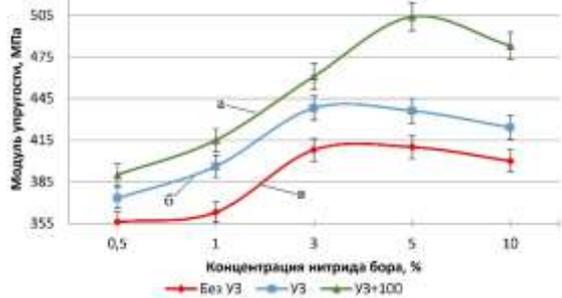


Рисунок 3 – Зависимость модуля упругости от концентрации нитрида бора

Figure 3 - Dependence of the modulus of elasticity on the concentration of boron nitride

На рисунке 4 приведены результаты сравнения влияния разных режимов прессования на твердость полимерных композиционных материалов. Установлено монотонное увеличение твердости в зависимости от увеличения концентрации гексагонального нитрида бора.

Анализ триботехнических характеристик материала в условиях сухого трения показал, что минимальная интенсивность массового изнашивания достигается на режиме прессования УЗ+100 при содержании наполнителя 5 масс. % и составляет 0,151 г/ч, что на 39 % меньше, чем у образцов, полученных при прессовании по традиционной технологии

(рисунок 5). Значение коэффициента трения при этом составляет 0,223, что на 11 % меньше по сравнению с режимом без внешнего энергетического воздействия (рисунок 6).

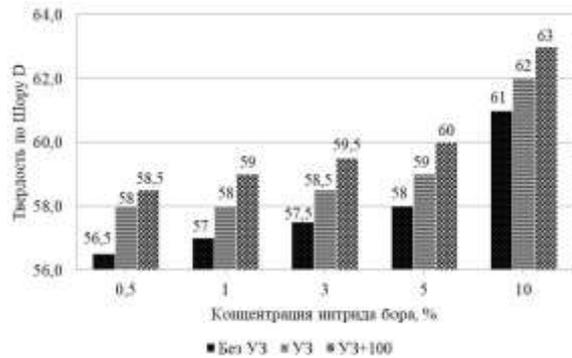


Рисунок 4 – Зависимость твердости по Шору (D) от концентрации нитрида бора

Figure 4 - Shore hardness (D) versus boron nitride concentration

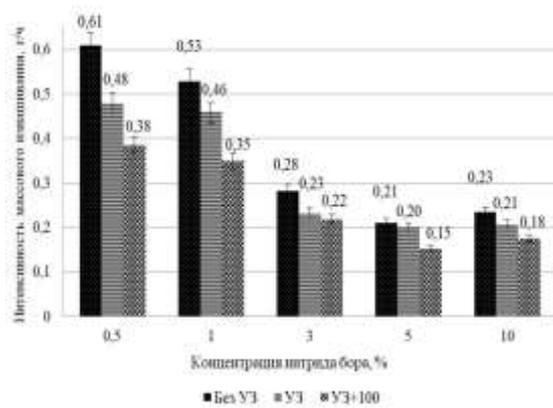


Рисунок 5 – Зависимость интенсивности массового изнашивания от концентрации нитрида бора

Figure 5 - Dependence of the intensity of mass wear on the concentration of boron nitride

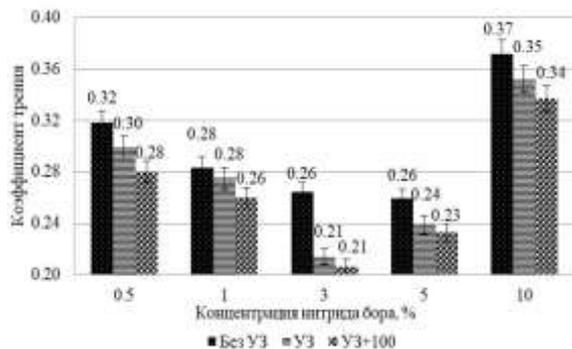


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента трения от концентрации нитрида бора

Figure 6 - Dependence of the friction coefficient on the boron nitride concentration

Модификация политетрафторэтилена гексагональным нитридом бора до 5 масс. % положительно влияет на триботехнические характеристики. Можно предположить, что низкие значения коэффициента трения и интенсивности массового изнашивания, полученные при прессовании с наложением ультразвуковых колебаний и низкочастотной модуляции, объясняются более равномерным распределением наполнителя в матрице, за счет одновременного вибрационного воздействия низкочастотной модуляции и теплового воздействия ультразвуковых колебаний на прессуемый материал. Технологический режим УЗ+100 приводит к формированию более однородной структуры, возникновению межмолекулярного взаимодействия в поверхностных слоях частиц порошка на этапе прессования ПКМ.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований определено рациональное содержание нитрида бора 5 масс. %, которое существенно влияет на прочностные и пластические свойства полимерных композиционных материалов.

Определен рациональный режим прессования ПКМ на основе ПТФЭ с применением ультразвукового воздействия частотой 17 кГц и одновременно наложенной низкочастотной амплитудной модуляцией 100 Гц.

Режим УЗ+100 позволяет повысить механические свойства ПКМ на основе ПТФЭ: предел прочности при растяжении на 10–18 % относительное удлинение на 11–20 %, модуль упругости – на 13–19 %, твердость – на 4 %.

На основании проведенных исследований триботехнических характеристик ПКМ на основе ПТФЭ модифицированных гексагональным нитридом бора 5 масс. % наблюдается снижение интенсивности массового изнашивания на 39 %, коэффициента трения – на 11 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang J., Yan, F., Xue Q. Tribological behavior of PTFE sliding against steel in sea water // *Wear*. – 2009. – 267 (9–10). – 1634–1641. DOI:10.1016/j.wear.2009.06.015.
2. Alam K.I., Dorazio A., Burris D.L. Polymers tribology exposed: eliminating transfer film effects to clarify ultralow wear of PTFE // *Tribology Letters*. 2020. 68. – 1–13. DOI:10.1007/s11249-020-01306-9.
3. Conte M., Fernandez B., Igartua A. Effect of surface temperature on tribological behavior of PTFE composites // *Proceedings of the Surface Effects and Contact Mechanics X*. UK. 2011. 1. 219–230. DOI:10.2495/SECM11019.

4. Полимерные композиционные материалы триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена / А.А. Охлопкова и др. // *Российский химический журнал*. 2008. № 3. С. 147–152.

5. Негров Д.А., Путинцев, В.Ю. Усовершенствование технологии прессования изделий из политетрафторэтилена // *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*. 2021. № 14 (5). С. 564–571. DOI: 10.17516/1999-494X-0333.

6. Машков Ю.К., Кропотин О.В., Чемисенко О.В. Разработка и исследование полимерного нанокompозита для металлополимерных узлов трения // *Омский научный вестник*. 2014. № 3 (133). С. 64–66.

7. Механохимический синтез полимерсодержащих композитов на основе нитрида бора / Т.Ф. Григорьева и др. // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2019. Т. 27. № 3. С. 293–297. DOI: 10.15372/KhUR2019136.

8. Наполнители для модификации современных полимерных композиционных материалов / А.С. Колосова и др. // *Фундаментальные исследования*. 2017. № 10–3. С. 459–465.

9. Стручкова Т.С., Нюрова А.Г., Николаева А.Д. Исследование влияния терморасширенного графита на триботехнические характеристики политетрафторэтилена // *Южно-Сибирский научный вестник*. 2019. № 4–1 (28). С. 303–306. DOI:10.25699/SSSB.2019.28.46390.

Информация об авторах

Д. А. Негров – доцент, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Омского государственного технического университета.

В. Ю. Путинцев – аспирант кафедры «Машиностроение и материаловедение» Омского государственного технического университета.

REFERENCES

1. Wang, J., Yan, F., Xue, Q. (2009). Tribological behavior of PTFE sliding against steel in sea water. *Wear*, 267 (9-10), 1634-1641. DOI:10.1016/j.wear.2009.06.015.
2. Alam, K.I., Dorazio, A. (2020). Polymers tribology exposed: eliminating transfer film effects to clarify ultralow wear of PTFE. *Tribology Letters*, (68), 1-13. DOI:10.1007/s11249-020-01306-9.
3. Conte, M., Fernandez, B. (2011). Effect of surface temperature on tribological behavior of PTFE composites. *Proceedings of the Surface Effects and Contact Mechanics X*. UK, 2011, (1), 219-230. DOI:10.2495/SECM11019.
4. Okhlopova, A.A., Petrova, P.N. (2008). Polymer composite materials for tribotechnical purposes based on polytetrafluoroethylene. *Russian Chemical Journal*, (3), 147-152. (in Russ.).
5. Negrov, D.A., Putintsev, V.Yu. (2021). Improvement of pressing technology of products from polytetrafluoroethylene, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4 2021*

ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И
ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Technol., 14(5), 564-571. (In Russ.). DOI: 10.17516/1999-494X-0333.

6. Mashkov, Yu.K., Kropotin, O.V. (2014). Development and research of polymer nanocomposite for metal-polymer friction units *Omsk Scientific Bulletin*. 3 (133). 64-66. (In Russ.).

7. Grigorieva, T.F., Kovaleva, S.A. (2019). Mechanochemical synthesis of polymer-containing composites based on boron nitride *Chemistry for Sustainable Development*. (3) 293-297. (In Russ.). DOI: 10.15372/KhUR2019136.

8. Vitkalova, I.A., Torlova, A.S. (2017). Fillers for modification of modern polymer composite materials, *Basic research*. (10-3). 459-465. (In Russ.).

9. Struchkova, T.S., Nyurova, A.G. (2019). Investigation of the effect of thermally expanded graphite on the tribotechnical characteristics of polytetraflu-

oroethylene, *South Siberian Scientific Bulletin*. (28).303-306. (In Russ.). DOI:10.25699/SSSB.2019.28.46390.

Information about the authors

D. A. Negrov - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Omsk State Technical University.

V. Yu. Putintsev - postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Omsk State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30.10.2021; одобрена после рецензирования 15.11.2021; принята к публикации 26.11.2021.

The article was received by the editorial board on 30 Oct 21; approved after reviewing on 15 Nov 21; accepted for publication on 26 Nov 21.