

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ С НАЛОЖЕННОЙ НИЗКОЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ, ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА

Д. А. Негров, В. Ю. Путинцев, А. И. Глотов, Д. А. Вебер

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Одной из задач полимерного материаловедения является изучение возможностей повышения комплекса упруго-прочностных характеристик и трибологических свойств полимерных композиционных материалов путем усовершенствования технологии изготовления. В данной работе рассмотрено воздействие ультразвуковых колебаний частотой 17 кГц с одновременно наложенной низкочастотной модуляцией частотой 100 Гц в процессе синтеза, на свойства и структуру многокомпонентного полимерного композиционного материала торговой марки КВН-3.

В результате проведенных исследований установлено, что влияние технологического режима прессования, заключающегося в совмещенном воздействии колебаний частотой 17 кГц и 100 Гц в процессе синтеза КВН-3, позволяет повысить комплекс упруго-механических характеристик: предел прочности при растяжении на 3 %, относительное удлинение на 6 %, модуль упругости на 10 %, твердость на 2 % по сравнению с промышленным способом изготовления, а также снизить интенсивность массового изнашивания на 68 % и коэффициент трения на 3 %.

Была рассмотрена структура полимерных композиционных материалов после разных технологических режимов прессования. Фибриллярная структура полимерной матрицы после технологического режима с воздействием ультразвуковых колебаний и низкочастотной модуляции становится более мелкой и равномерно распределенной.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, ультразвуковое воздействие, низкочастотная модуляция, полимерные композиционные материалы, износостойкость.

Введение

Долговечность работы металлополимерных узлов трения во многом определяется износостойкостью применяемого композита. Для изготовления элементов пар трения, используемых в криогенной технике (поршневые кольца безмасляных компрессоров), применяются полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе политетрафторэтилена торговой марки КВН-3, обладающего стабильно низким коэффициентом трения при эксплуатации со скоростью скольжения до 6 м/с и свойством самосмазывания в период эксплуатации [1]. Однако входящие в состав композита металлические наполнители из-за низкой адгезионной способности склонны к вырыванию из полимерной матрицы в процессе эксплуатации, что приводит к изменению геометрии контактной поверхности пары трения и увеличению её износа [2–3]. Проводимые исследования в области поиска новых технологий изготовления полимерных материалов для повышения износостойкости являются актуальными с точки зрения повышения надежности эксплуатации оборудования [4–8].

Одним из методов повышения износостойкости композитов является воздействие энергии ультразвуковых колебаний в процессе холодного прессования изделия, в результате чего наблюдается ряд физических и химических явлений, приводящих

к изменению адгезионных свойств, способствующих повышению износостойкости готовых изделий [9–10]. Целью данной работы является исследование влияния ультразвукового воздействия с одновременно наложенной низкочастотной модуляцией на комплекс упруго-прочностных и трибологических свойств, а также структуру материала КВН-3.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является промышленно выпускаемый многокомпонентный композиционный материал марки КВН-3, в состав которого входит: фторопласт-4 — 77 масс. %, порошок бронзы — 8 масс. %, порошок свинца — 7 масс. %, дисульфид молибдена — 3 масс. %, кокс — 5 масс. %.

Предварительно, перед прессованием образцов ПКМ, проводилось удаление влаги из смеси композиционного материала в лабораторном вакуумном сушильном шкафу в течение четырех часов и последующее перемешивание с измельчением высушенной смеси в бисерной лабораторной мельнице, после чего проводилось просеивание смеси через мелкогабаритное сито и равномерное заполнение всего объема пресс-формы.

В данной работе методика исследования заключалась в сравнении влияния технологий изготовления материала КВН-3 на упруго-прочностные характеристики и трибологические свойства.

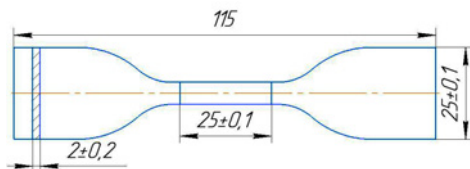


Рис. 1. Образец «Тип 1» для определения механических свойств
Fig. 1. Sample «Type 1» for determining mechanical properties



Рис. 2. Схема-график ступенчатой термической обработки
Fig. 2. Diagram of stepwise heat treatment

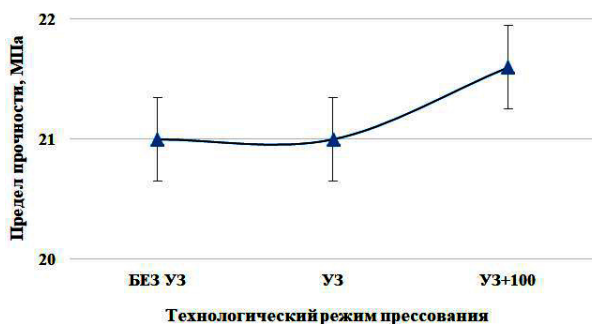


Рис. 3. Зависимость предела прочности от технологического режима прессования
Fig. 3. Dependence of the ultimate strength on the technological pressing mode

Первая технология изготовления полностью повторяла промышленную технологию изготовления композиционного материала КВН-3 — холодное прессование композиционной смеси без наложения ультразвуковых колебаний (без УЗ). Вторая технология — прессование с наложением ультразвуковых колебаний частотой 17 кГц. Третья технология — прессование с наложением ультразвуковых колебаний частотой 17 кГц и низкочастотной модуляцией 100 Гц (УЗ + 100). Для всех исследуемых режимов изготовления давление прессования 80 МПа, время прессования 60 секунд. Прессование образцов проводилось при комнатной температуре, в помещении с относительной влажностью 40–50 %.

Образцы материала изготавливали на установке, состоящей из гидравлического пресса, ультразвукового генератора, магнитострикционного преобразователя, матрицы и ультразвукового пуансона. Образцы для исследования механических свойств были изготовлены в виде лопатки «Тип 1» в соответствии с ГОСТ 11262-2017 (рис. 1). Для определения трибологических свойств образцы были изготовлены в виде цилиндров диаметром $10,0 \pm 0,1$ мм, длиной $15 \pm 0,1$ мм.

Заключительным этапом изготовления образцов являлось ступенчатое спекание образцов в лабора-

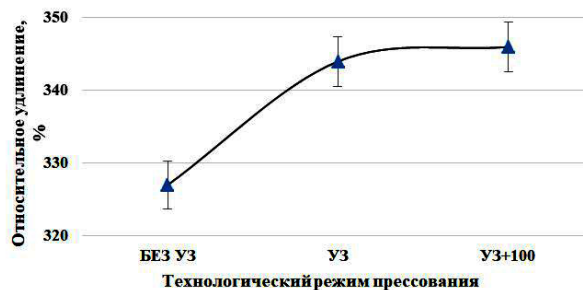


Рис. 4. Зависимость относительного удлинения от технологического режима прессования
Fig. 4. Dependence of relative elongation on the technological pressing mode

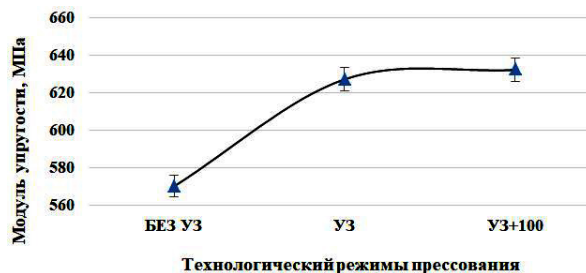


Рис. 5. Зависимость модуля упругости от технологического режима прессования
Fig. 5. Dependence of the modulus of elasticity on the technological pressing mode

торной печи. Технологический режим спекания заключался в плавном нагреве до 360 °C со скоростью 2 C/мин, последующей выдержке при температуре 360 ± 1 °C, исходя из расчета 9 мин на 1 мм толщины образца, регулируемом охлаждении со скоростью 0,5 C/мин до 327 °C и дальнейшим охлаждением вместе с печью до комнатной температуры (рис. 2).

Для определения предела прочности и относительного удлинения проводилось согласно ГОСТ 11262-80, а также модуля упругости в соответствии с методикой ГОСТ 25.601-80. Определение твердости проводилось по Шору (шкала D) согласно ГОСТ 24621-2015. Трибологические свойства материалов определялись на машине трения УМТ-2168.

Для проведения исследований надмолекулярной структуры поверхностного слоя образцов ПКМ был использован растровый электронный микроскоп JSM-5700 фирмы JEOL (Япония).

Результаты исследования

В результате сравнения влияния технологий прессования на предел прочности установлено, что использование технологии ультразвукового прессования (УЗ) по сравнению с промышленной технологией (БЕЗ УЗ) практически не приводит к изменению прочности материала. Применение режима с низкочастотной модуляцией (УЗ + 100) позволяет лишь незначительно увеличить предел прочности на 3 % (рис. 3).

Ультразвуковое воздействие на прессуемый композиционный материал повышает относительное удлинение. Наибольшие показатели достигаются при изготовлении по режиму (УЗ + 100) и со-

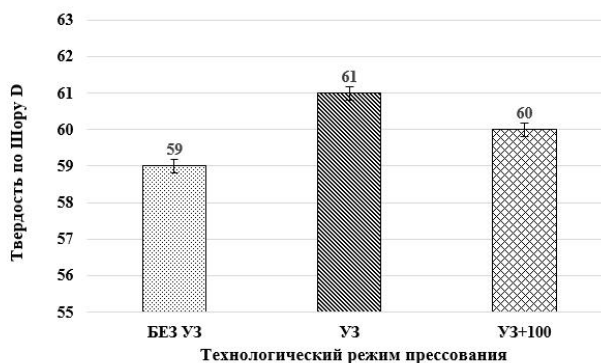


Рис. 6. Зависимость твердости от технологического режима прессования
Fig. 6. Dependence of hardness on the technological pressing mode

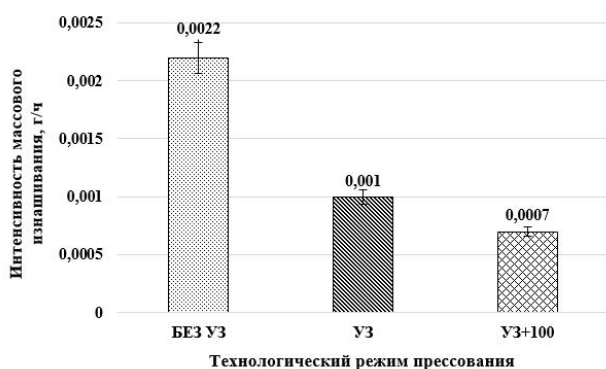


Рис. 7. Зависимость интенсивности массового изнашивания от технологического режима прессования
Fig. 7. Dependence of the intensity of mass wear on the technological pressing mode

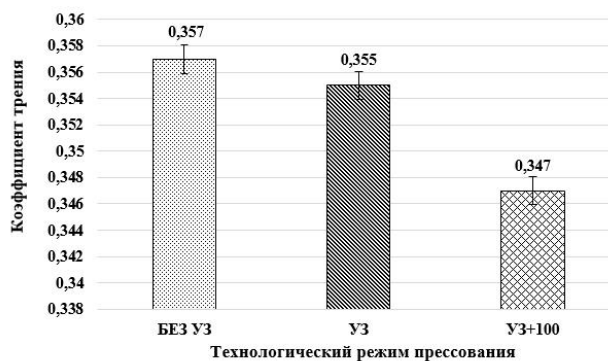


Рис. 8. Зависимость коэффициента трения от технологического режима прессования
Fig. 8. Dependence of the friction coefficient on the technological pressing mode

ставляют 347 %, что на 6 % выше, чем у образцов промышленной технологии прессования (рис. 4).

Применение технологического режима (УЗ + 100) также позволяет увеличить модуль упругости (рис. 5) до 631 МПа, что на 10 % больше, по сравнению с изготовлением промышленной технологии прессования. Твердость по Шору D образцов КВН-3 находится в диапазоне 59–61 единица (рис. 6).

В результате исследования трибологических свойств материала КВН-3 установлено, что приме-

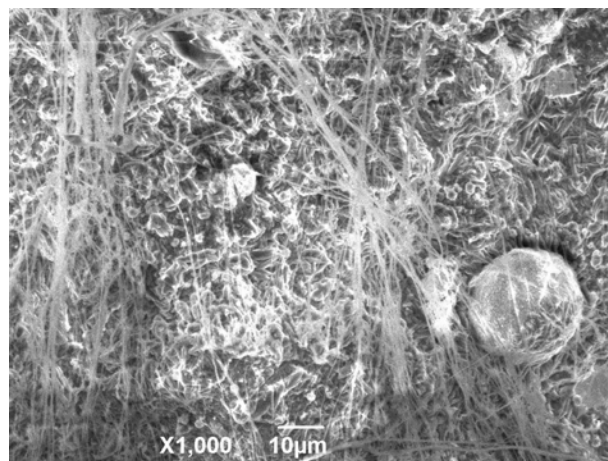


Рис. 9. Микрофотография скола образца КВН-3, полученного по промышленной технологии прессования (БЕЗ УЗ)

Fig. 9. Micrograph of the cleavage of the KVN-3 sample obtained using industrial pressing technology (without ultrasound)

нение технологии синтеза (УЗ + 100) позволяет существенно снизить интенсивность массового изнашивания на 68 % (рис. 7) и снизить коэффициент трения на 3 % (рис. 8).

Предположительно, значительное повышение износостойкости КВН-3, при его изготовлении с применением ультразвуковых колебаний с наложенной низкочастотной модуляцией, может быть связано с более равномерным распределением по всему объему и увеличением адгезии частиц наполнителей в полимерной матрице.

Формирование надмолекулярной структуры связано с процессами трансформации и распределения частиц модификаторов в полимерной матрице при прессовании и требует подробного изучения при помощи электронной микроскопии. Для предотвращения разрушения поверхности образцов под воздействием электронного пучка исследования проводили при величине энергии электронов 5 кэВ, что не способствовало ухудшению изображений.

Микрофотографии структуры изготовленных образцов ПКМ характеризуются присутствием структурных элементов разнообразных геометрических форм и размеров из-за многокомпонентного наполнения композита. У образцов, полученных согласно промышленной технологии изготовления (рис. 9), обнаружена общая неоднородность структуры в объеме полимерной матрицы, что может свидетельствовать о неравномерном распределении частиц наполнителей и о процессе скопления наполнителей в менее упорядоченных областях материала [11]. Структура образцов, изготовленных по технологическому режиму (УЗ), отличается отсутствием областей скопления модификаторов, фибриллы полимерной основы незначительно увеличены (рис. 10).

Микроструктура образца КВН-3, полученного по технологическому режиму изготовления УЗ + 100 (рис. 11), заметно отличается от образца, изготовленного в соответствии с промышленной технологией. Наблюдается увеличение количества равномерно распределенных твердых частиц наполнителя округлой формы, локализованных в приповерхностном слое ПКМ, что в дальнейшем способствует защите от разрушения при фрикционном контакте материалов. Фибриллярная структура политетрафторэтиленовой матрицы становится более мелкой

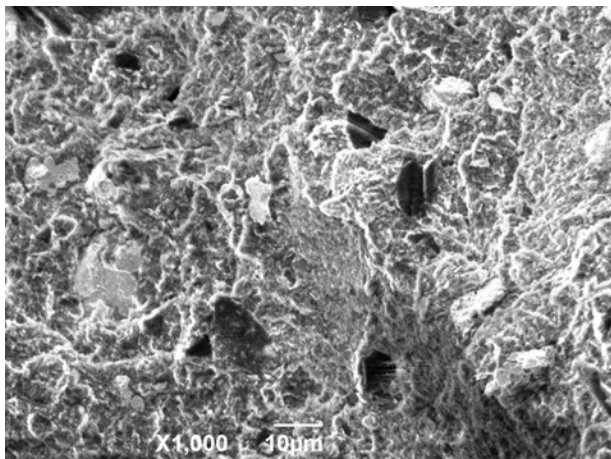


Рис. 10. Микрофотография скола образца КВН-3, полученного по ультразвуковой технологии прессования (УЗ)

Fig. 10. Microphotograph of a chip of the KVN-3 sample obtained using ultrasound pressing technology (ultrasound)

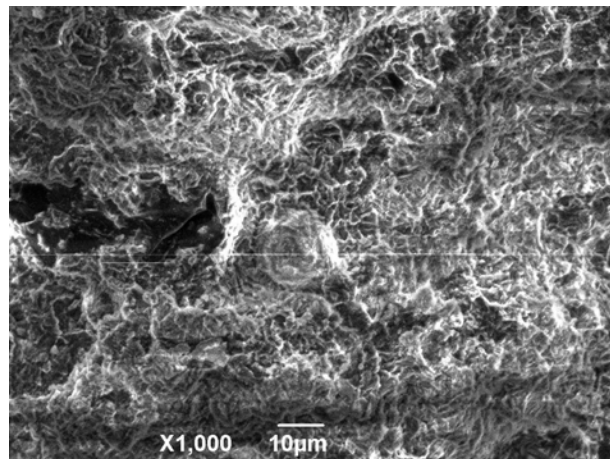


Рис. 11. Микрофотография скола образца КВН-3, полученного по ультразвуковой технологии прессования с наложением низкочастотной модуляции (УЗ+100)

Fig. 11. Microphotograph of a chip of a KVN-3 sample obtained using ultrasound pressing technology with the application of low-frequency modulation (ultrasound+100)

и однородной в сравнении с микрофотографиями сколов, полученных после других технологических режимов прессования.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено влияние технологий прессования полимерного композиционного материала КВН-3 на его комплекс упруго-прочностных характеристик и трибологических свойств.

Режим УЗ+100 позволяет повысить механические свойства ПКМ: предел прочности при растяжении на 3 %, относительное удлинение на 6 %, модуль упругости на 10 %, твердость на 2 %.

На основании проведенных исследований триботехнических характеристик КВН-3 наблюдается значительное снижение интенсивности массового изнашивания на 68 % и снижение коэффициента трения на 3 %.

Микрофотографии структуры образцов КВН-3 свидетельствуют, что при ультразвуковой технологии прессования с наложением низкочастотной модуляции частицы модификаторов композиционного материала упорядоченно распределены по объему материала, структура однородная, микрофибриллы политетрафторэтилена более мелкие в сравнении с другими технологическими режимами прессования.

Список источников

1. КВН-3 (Композиционные антифрикционные материалы для узлов трения и механизмов): справочник. URL: <https://cryontk.ru/services/spetsialnye-tehnologii/> (дата обращения: 10.09.2023).
2. Колесников И. В. Межатомные взаимодействия на поверхностях металлополимерного трибосопряжения // Мир транспорта. 2015. Т. 13, № 1 (56). С. 16–27.
3. Рогов В. Е., Цыренова Г. Д., Черский И. Н. Трибосинтез фторида свинца при трении фторопластовых свинецсодержащих композиций и его влияние на их износостойкость // Трение и износ. 2009. Т. 30, № 4. С. 390–395.
4. Машков Ю. К., Кропотин О. В., Чемисенко О. В. Разработка и исследование полимерного нанокompозита для ме-

таллополимерных узлов трения // Омский научный вестник. 2014. № 3 (133). С. 64–66. EDN: TKDJUD.

5. Кокосова А. С., Сокольская М. К., Виткалова И. А. [и др.]. Наполнители для модификации современных полимерных композиционных материалов // Фундаментальные исследования. 2017. № 10-3. С. 459–465.

6. Негров Д. А., Путинцев В. Ю. Усовершенствование технологии прессования изделий из политетрафторэтилена // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2021. № 14 (5). С. 564–571. DOI: 10.17516/1999-494X-0333.

7. Григорьева Т. Ф., Ковалева С. А., Жорник В. И. [и др.]. Механохимический синтез полимерсодержащих композитов на основе нитрида бора // Химия в интересах устойчивого развития. 2019. Т. 27, № 3. С. 293–297. DOI: 10.15372/KhUR2019136.

8. Стручкова Т. С., Нюроева А. Г., Николаева А. Д. Исследование влияния терморасширенного графита на триботехнические характеристики политетрафторэтилена // Южно-Сибирский научный вестник. 2019. № 4-1 (28), С. 303–306.

9. Негров Д. А., Еремин Е. Н., Путинцев В. Ю., Мулюкова А. Р. Изменение механических свойств полимерного материала при воздействии ультразвуковых колебаний // Ученые Омска — региону: материалы I Регион. науч.-техн. конф., 28–29 декабря 2016 года. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. С. 81–84.

10. 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.

11. Соломко В. П. О явлении межструктурного наполнения и его влияния на свойства полимера // Механика полимеров. 1976. № 1. С. 162–166.

НЕГРОВ Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение», секция «Материаловедение и технология конструкционных материалов» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 4888-7947

AuthorID (РИНЦ): 684462

AuthorID (SCOPUS): 54959361600

Адрес для переписки: negrov_d_a@mail.ru

ПУТИНЦЕВ Виталий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение», секция «Материаловедение и технология конструкционных материалов» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 7304-5954

AuthorID (РИНЦ): 827297

AuthorID (SCOPUS): 57203584921

Адрес для переписки: putintsev_vit@mail.ru

ГЛОТОВ Алексей Игоревич, магистрант, гр. МТМм-221 Машиностроительного института, ассистент кафедры «Машиностроение и материаловедение», секция «Материаловедение и технология конструкционных материалов» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 5491-2176

AuthorID (РИНЦ): 1189428,

Адрес для переписки: aiglотов@omgtu.ru

ВЕБЕР Денис Александрович, студент, гр. МТМ-201 Машиностроительного института, лаборант кафе-

дры «Машиностроение и материаловедение», секция «Материаловедение и технология конструкционных материалов» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 9455-4101

AuthorID (РИНЦ): 1123215

Адрес для переписки: den.veber.18@bk.ru

Для цитирования

Негров Д. А., Путинцев В. Ю., Глотов А. И., Вебер Д. А. Влияние ультразвуковых колебаний с наложенной низкочастотной модуляцией на механические, трибологические свойства и структуру многокомпонентного полимерного композита // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 4. С. 79–84. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-79-84.

Статья поступила в редакцию 17.08.2023 г.

© Д. А. Негров, В. Ю. Путинцев, А. И. Глотов, Д. А. Вебер

UDC 534-16:531.44

DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-79-84

EDN: NVXVTO

THE EFFECT OF ULTRASONIC VIBRATIONS WITH SUPERIMPOSED LOW-FREQUENCY MODULATION ON THE MECHANICAL, TRIBOLOGICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF A MULTICOMPONENT POLYMER COMPOSITE

D. A. Negrov, V. Yu. Putintsev, A. I. Glotov, D. A. Veber

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

One of the tasks of polymer materials science is to study the possibilities of improving the complex of elastic-strength characteristics and tribological properties of polymer composite materials by improving the manufacturing technology. In this paper, the influence of ultrasonic vibrations with a frequency of 17 kHz with a low-frequency vibration with a frequency of 100 Hz during synthesis on the properties and structure of a multicomponent polymer composite material of the KVN-3 trademark is considered. The result of the research, it is found that the influence of the technological mode of pressing, consisting in the combined effect of ultrasonic vibrations with frequency and low-frequency vibration during the synthesis of KVN-3, makes it possible to increase the complex of elastic-mechanical characteristics: tensile strength by 3 %, elongation by 6 %, modulus of elasticity by 10 %, hardness by 2 %, compared to the industrial manufacturing method, as well as to reduce the intensity of mass wear by 68 % and the coefficient of friction by 3 %.

The structure of polymer composite materials after different technological pressing modes is examined. The fibrillar structure of the polymer matrix after the technological regime with the influence of ultrasonic vibrations and low-frequency modulation becomes finer and more uniform.

Keywords: polytetrafluoroethylene, ultrasonic exposure, low-frequency modulation, polymer composite materials, wear resistance.

References

1. KVN-3 (Kompozitsionnyye antifriktsionnyye materialy dlya uzlov treniya i mekhanizmov): spravochnik [KVN-3 (Composite antifriction materials for friction units and mechanisms): handbook]. URL: <https://cryontk.ru/services/spetsialnyye-tekhnologii/> (accessed: 10.09.2023). (In Russ.).

2. Kolesnikov I. V. Mezhatomnyye vzaimodeystviya na poverkhnostyakh metallopolimernogo tribosopryazheniya [Interatomic interactions on the surfaces of metal polymer tribocoupling] // Mir transporta. *World of Transport and Transportation*. 2015. Vol. 13, no. 1 (56). P. 16–27. (In Russ.).

3. Rogov V. E., Tsyrenova G. D., Cherskiy I. N. Tribosintez florida svintsa pri trenii ftoroplastovykh svinetssozderzhashchikh

kompozitsiy i ego vliyaniye na ikh iznosostoykost' [Tribosynthesis of lead fluoride in friction of fluoroelastomer lead-containing composites and its effect on wear resistance] // *Treniye i iznos. Friction and Wear*. 2009. Vol. 30, no. 4. P. 390–395. (In Russ.).

4. Mashkov Yu. K., Kropotin O. V., Chemisenko O. V. Razrabotka i issledovaniye polimernogo nanokompozita dlya metallopolymernykh uzlov treniya [Development and study of polymer nanocomposite for metalpolymer friction units] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2014. No. 3 (133). P. 64–66. (In Russ.).

5. Kokosova A. S., Sokol'skaya M. K., Vitkalova I. A. [et al.]. Napolniteli dlya modifikatsii sovremennykh polimernykh kompozitsionnykh materialov [Fillers to modify the modern polymer composite materials] // *Fundamental'nyye issledovaniya. Fundamental Research*. 2017. No. 10-3. P. 459–465. (In Russ.).

6. Negrov D. A., Putintsev V. Yu. Usovershenstvovaniye tekhnologii pressovaniya izdeliy iz politetraftoretilena [Improvement of Pressing Technology of Products from Polytetrafluoroethylene] // *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2021. No. 14 (5). P. 564–571. DOI: 10.17516/1999-494X-0333. (In Russ.).

7. Grigoryeva T. F., Kovaleva S. A., Zhornik V. I. [et al.]. Mekhanokhimicheskiy sintez polimersoderzhashchikh kompozitov na osnove nitrída bora [Mechanochemical synthesis of polymer-containing composites based on boron nitride] // *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya. Chemistry for Sustainable Development*. 2019. Vol. 27, no. 3. P. 293–297. DOI: 10.15372/KhUR2019136. (In Russ.).

8. Struchkova T. S., Nyurova A. G., Nikolayeva A. D. Issledovaniye vliyaniya termorasshirennoy grafitá na tribotekhnicheskiye kharakteristiki politetraftoretilena [Investigation of the influence of thermally expanded graphite on tribotechnical characteristics of polytetrafluoroethylene] // *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik. South-Siberian Scientific Bulletin*. 2019. No. 4-1 (28). P. 303–306. (In Russ.).

9. Negrov D. A., Eremin E. N., Putintsev V. Yu., Mulyukova A. R. Izmeneniye mekhanicheskikh svoystv polimernogo materila pri vozdeystvii ul'trazvukovykh kolebaniy [Change of mechanical properties of polymer material under the influence of ultrasonic vibrations] // *Uchenyye Omska – regionu. Scientists of Omsk – to the Region*. Omsk, 2016. P. 81–84. (In Russ.).

10. Negrov D. A., Putintsev V. Yu. Vliyaniye nizkochastotnoy modulyatsii na mekhanicheskiye svoystva i tribotekhnicheskiye kharakteristiki polimernykh kompozitsionnykh materialov [Influence of low-frequency modulation on mechanical properties and tribotechnical characteristics of polymer composite materials] // *Polzunovskiy vestnik. Polzunovskiy Vestnik*. 2021. No. 4. P. 140–145. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.018. (In Russ.).

11. Solomko V. P. O yavlenii mezhstrukturnogo napolneniya i ego vliyanií na svoystva polimera [On the phenomenon of interstructural filling and its influence on polymer properties] //

Mekhanika polimerov. Mechanics of Polymers. 1976. No. 1. P. 162–166. (In Russ.).

NEGROV Dmitriy Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Mechanical Engineering and Materials Science Department, Materials Science and Technology of Structural Materials Section, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 4888-7947

AuthorID (RSCI): 684462

AuthorID (SCOPUS): 54959361600

Correspondence address: negrov_d_a@mail.ru

PUTINTSEV Vitaliy Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Mechanical Engineering and Materials Science Department, Materials Science and Technology of Structural Materials Section, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 7304-5954

AuthorID (RSCI): 827297

AuthorID (SCOPUS): 57203584921

Correspondence address: putintsev_vit@mail.ru

GLOTOV Aleksey Igorevich, Undergraduate, gr. MTMm-221 of Mechanical Engineering Institute, Assistant of Mechanical Engineering and Materials Science Department, Materials Science and Technology of Structural Materials Section, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 5491-2176

AuthorID (RSCI): 1189428,

Correspondence address: aiglотов@omgtu.ru

VEBER Denis Aleksandrovich, Student, gr. MTM-201 of Mechanical Engineering Institute, Laboratory Assistant of Mechanical Engineering and Materials Science Department, Materials Science and Technology of Structural Materials Section, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 9455-4101

AuthorID (RSCI): 1123215

Correspondence address: den.veber.18@bk.ru

For citations

Negrov D. A., Putintsev V. Yu., Glotov A. I., Veber D. A. The effect of ultrasonic vibrations with superimposed low-frequency modulation on the mechanical, tribological properties and structure of a multicomponent polymer composite // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2023. Vol. 7, no. 4. P. 79–84. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-79-84.

Received August 17, 2023.

© D. A. Negrov, V. Yu. Putintsev, A. I. Glotov, D. A. Veber