

EDN: LOUNAM

УДК 621.9.048.6:539.2531.44:534.16

**The Effect of Ultrasonic Vibrations  
with Simultaneously Superimposed Low-Frequency Modulation  
on the Properties of Polytetrafluoroethylene Modified  
with Detonation Nanodiamonds**

**Dmitrij A. Negrov, Vitalij Yu. Putintsev,  
Evgenij A. Rogachev and Aleksej I. Glotov\***

*Omsk State Technical University  
Omsk, Russian Federation*

Received 30.03.2023, received in revised form 28.08.2023, accepted 05.09.2023

**Abstract.** Improving the process of cold pressing technology of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene, in order to obtain parts of friction units with predetermined operational properties, to ensure their durability and wear resistance, is an urgent task of modern materials science. The article considers the influence of technological modes of pressing on the tribotechnical characteristics and mechanical properties of polytetrafluoroethylene modified with detonation nanodiamonds of various concentrations.

As a result of the research, it was found that the use of the technological mode of ultrasonic pressing with a frequency of 17 kHz and simultaneously superimposed low-frequency amplitude modulation of 100 Hz for pressing products made of polytetrafluoroethylene modified with detonation nanodiamonds of 0.5 % mass, allows to increase the tensile strength by 18 %, elongation by 14 %, modulus of elasticity by 15 % and reduce the intensity of mass wear by 22 % and the coefficient of friction by 17 %.

**Keywords:** polymer composite material, polytetrafluoroethylene, detonation nanodiamonds, ultrasonic exposure, low-frequency modulation.

Citation: Negrov D. A., Putintsev V. Yu., Rogachev E. A., Glotov A. I. The effect of ultrasonic vibrations with simultaneously superimposed low-frequency modulation on the properties of polytetrafluoroethylene modified with detonation nanodiamonds. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(7), 835–842. EDN: LOUNAM



# Влияние ультразвуковых колебаний с одновременно наложенной низкочастотной модуляцией на свойства политетрафторэтилена, модифицированного детонационными наноалмазами

Д. А. Негров, В. Ю. Путинцев,  
Е. А. Рогачев, А. И. Глотов

*Омский государственный технический университет  
Российская Федерация, Омск*

**Аннотация.** Улучшение процесса технологии холодного прессования полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена, с целью получения деталей узлов трения с заранее заданными эксплуатационными свойствами, для обеспечения их долговечности и износостойкости является актуальной задачей современного материаловедения. В статье рассмотрено влияние технологических режимов прессования на триботехнические характеристики и механические свойства политетрафторэтилена, модифицированного детонационными наноалмазами различной концентрации.

В результате исследований установлено, что применение технологического режима ультразвукового прессования с частотой 17 кГц и одновременно наложенной низкочастотной амплитудной модуляцией 100 Гц для прессования изделий из политетрафторэтилена, модифицированного детонационными наноалмазами 0,5 % масс., позволяет повысить предел прочности при растяжении на 18 %, относительное удлинение на 14 %, модуль упругости на 15 %, снизить интенсивность массового изнашивания на 22 % и коэффициент трения на 17 %.

**Ключевые слова:** полимерный композиционный материал, политетрафторэтилен, детонационные наноалмазы, ультразвуковое воздействие, низкочастотная модуляция.

Цитирование: Негров Д. А. Влияние ультразвуковых колебаний с одновременно наложенной низкочастотной модуляцией на свойства политетрафторэтилена, модифицированного детонационными наноалмазами / Д. А. Негров, В. Ю. Путинцев, Е. А. Рогачев, А. И. Глотов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(7). С. 835–842. EDN: LOUNAM

## Введение

Текущий этап развития промышленных отраслей неразрывно связан с постоянным ростом внедрения в производство полимерных композиционных материалов (ПКМ). Применение ПКМ позволяет изготавливать различные детали с высокими эксплуатационными требованиями, в том числе и металлополимерные узлы трения, требующие высокой износостойкости и низкого коэффициента трения, для работы в условиях сухого контакта.

Наиболее перспективными из композиционных материалов, работающих в условиях сухого трения, являются композиты на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) [1–2]. Высокие механические и антифрикционные свойства политетрафторэтилена в месте контакта полимера с поверхностью металла существенно зависят от удельного давления, скорости скольжения, температуры и шероховатости поверхности. ПТФЭ обладает низким коэффициентом трения (0,04–0,08) при скоростях скольжения не более 0,01 м/с, увеличение скорости скольжения приводит к снижению триботехнических характеристик [3–5].

Основным направлением улучшения физико-механических и триботехнических свойств полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена является введение

в полимерную матрицу различных наполнителей-модификаторов (дисперсных, волокнистых, ультрадисперсных, нанодисперсных) [6–7]. Применение в качестве наполнителя детонационных наноалмазов (ДНА) при объёмной доле заполнения (~2 % масс.) оказывает существенное влияние на повышение износостойкости и на снижение коэффициента трения композиционного материала [8–9].

Для повышения качества холодного прессования применялся один из перспективных способов уплотнения порошка композиционной смеси с применением энергии ультразвуковых колебаний с одновременно наложенной низкочастотной модуляцией. Используемая технология обеспечивает увеличение степени взаимодействия наполнителя с полимером, повышает равномерность укладки частиц полимера, уменьшает поры и позволяет разрушить арочные образования в процессе формирования ПКМ [10].

**Цель работы** – изучение влияния ультразвуковых колебаний с одновременно наложенной низкочастотной амплитудной модуляцией на механические свойства и триботехнические характеристики полимерного композиционного материала на основе политетрафторэтилена, модифицированного детонационными наноалмазами.

### Объекты и методы исследования

Объектом исследования является полимерный композиционный материал на основе политетрафторэтилена марки ПН-20, модифицированного детонационными наноалмазами. Для исследований были выбраны оказывающие наибольшее влияние на трибологические характеристики концентрации ДНА в ПТФЭ: 0,1; 0,5; 1,0; 1,5; и 2,0 масс.% [8, 9].

Первоначально осуществлялось сухое размельчение и смешивание компонентов композиционного материала в лабораторной мельнице DM-6 с частотой вращения ножей не менее 2800 мин<sup>-1</sup>. Далее была проведена сушка подготовленной смеси ПТФЭ+ДНА при температуре 150 °С в течение 4 часов. После чего смесь просеивалась через мелкоразмерное сито.

Для сравнения механических свойств и триботехнических характеристик образцы были изготовлены методом холодного прессования по трем технологическим режимам:

При первом режиме проводилось традиционное прессование без внешнего энергетического воздействия (без УЗ). Второй режим заключался в воздействии ультразвуковых колебаний 17 кГц без низкочастотной модуляции (УЗ). Третий режим – ультразвуковые колебания 17 кГц с одновременно наложенной низкочастотной модуляцией 100 Гц (УЗ+100).

Образцы для исследований изготавливались на разработанной установке, состоящей: из гидравлического пресса ГМС-50, модернизированного ультразвукового генератора УЗГ-6М, работающем в частотном диапазоне 17–23 кГц и магнитострикционного преобразователя ПМС-15А-18. Усилие прессования 80 МПа, время прессования составило 60 с, амплитуда колебаний инструмента 14 мкм. Прессование образцов проводилось при комнатной температуре.

Последним этапом каждого технологического режима была ступенчатая термическая обработка – спекание, которое заключалось в плавном нагреве до  $(360 \pm 1)$  °С со скоростью 2 °С/мин, выдержке образцов полимерного композита при температуре  $360 \pm 1$  °С из расчета 9 мин на 1 мм толщины образца, регулируемом охлаждении со скоростью 0,5 °С/мин до 327 °С и дальнейшем охлаждении 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 согласно ГОСТ 25.601–80.

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

### Результаты исследований и обсуждения

На основании проведенных экспериментальных исследований установлено, что у образцов, отпрессованных с ультразвуковым воздействием и низкочастотной модуляцией 100 Гц (рис 1а) при концентрации ДНА 0,5 масс.% достигается наибольшее значение предела прочности 26,8 МПа, что на 18 % больше, чем при изготовлении образцов по традиционной технологии без применения ультразвуковых колебаний (рис 1с). Дальнейшее увеличение концентрации наполнителя приводит к снижению предела прочности.

Максимальное значение относительного удлинения при разрыве достигается также при прессовании по технологическому режиму с ультразвуковым воздействием и низкочастотной модуляцией при концентрации ДНА 0,5 масс.% и составляет 321 % (рис. 2), по сравнению с традиционным режимом прессования позволяет добиться увеличения относительного удлинения на 14 %. Стоит отметить, что увеличение концентрации наполнителя ДНА до 2 масс.% приводит к постепенному снижению относительного удлинения.

При анализе модуля упругости образцов было установлено, что максимальные значения вне зависимости от технологии изготовления достигаются также при концентрации ДНА 0,5 масс.% (рис. 3а, 3б, 3с). Наибольший показатель модуля упругости 315 МПа обеспечивает режим прессования с ультразвуковым воздействием 17 кГц и наложенной низкочастотной

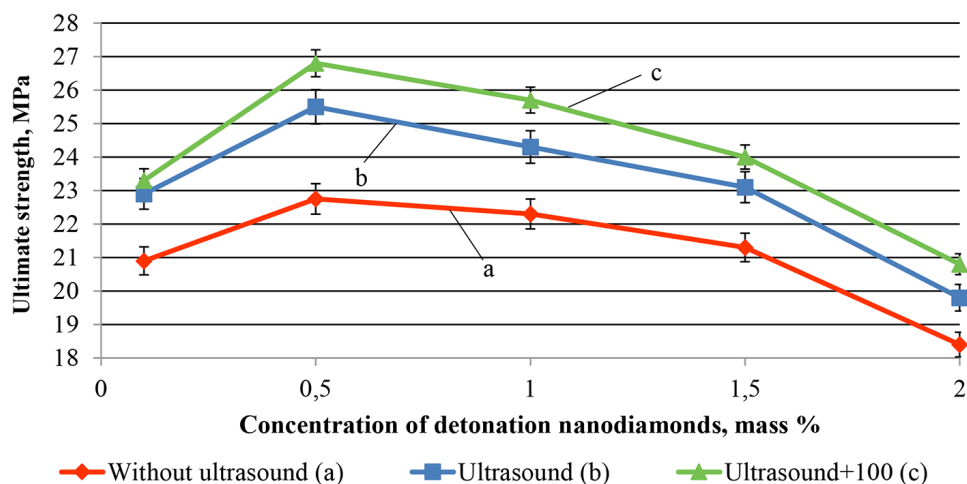


Рис. 1. Зависимость предела прочности от концентрации детонационных наноалмазов

Fig. 1. Dependence of ultimate strength on the concentration of detonation nanodiamonds

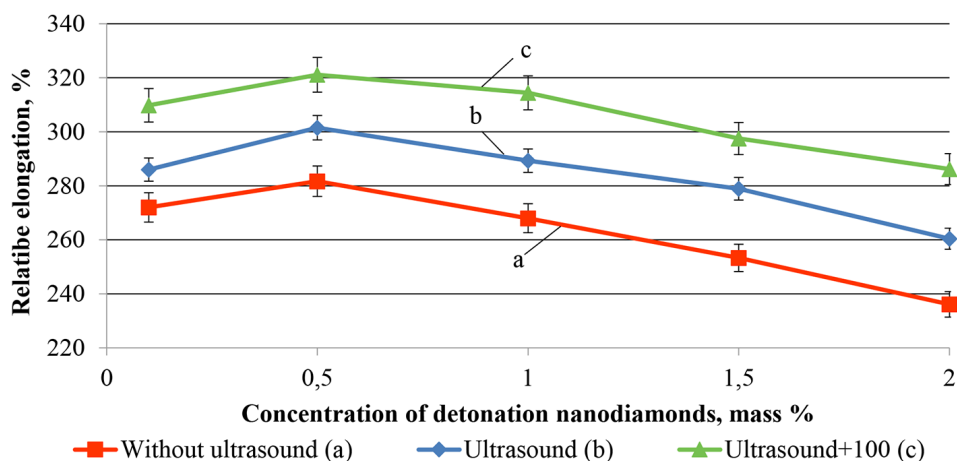


Рис. 2. Зависимость относительного удлинения от концентрации детонационных наноалмазов

Fig. 2. Dependence of the relative elongation on the concentration of detonation nanodiamonds

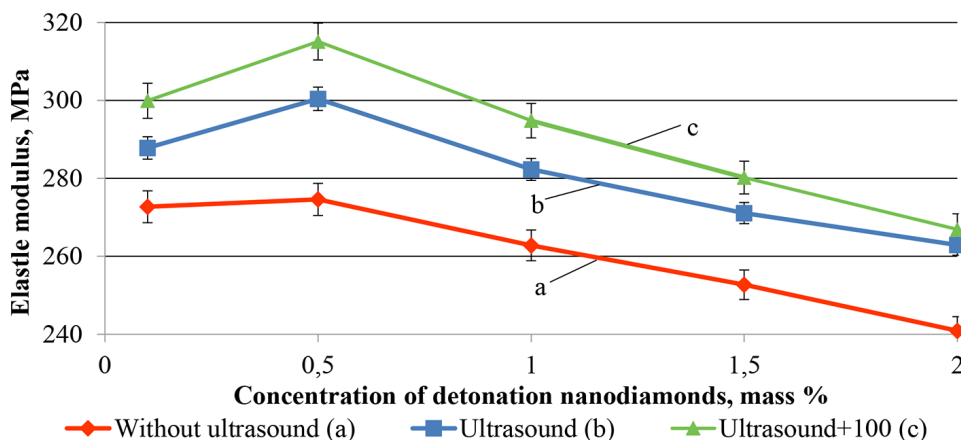


Рис. 3. Зависимость модуля упругости от концентрации детонационных наноалмазов

Fig. 3. Dependence of the modulus of elasticity on the concentration of detonation nanodiamonds

модуляцией 100 Гц, что на 15 % больше, чем при изготовлении по традиционной технологии прессования.

При анализе триботехнических характеристик образцов ПКМ было установлено, что минимальная интенсивность массового изнашивания достигается у образцов с концентрацией ДНА 0,5 масс.%, спрессованных при ультразвуковом воздействии, и низкочастотной модуляцией и составляет 0,21 г/ч, что на 22 % меньше, чем при изготовлении по традиционной технологии прессования без ультразвукового воздействия (рис. 4).

Значение коэффициента трения при этом составляет 0,27, что на 17 % меньше, чем у образцов, синтезированных без ультразвукового прессования (рис. 5). Увеличение концентрации наполнения ДНА вплоть до 2 масс.% приводит к незначительному увеличению интенсивности изнашивания и коэффициента трения.

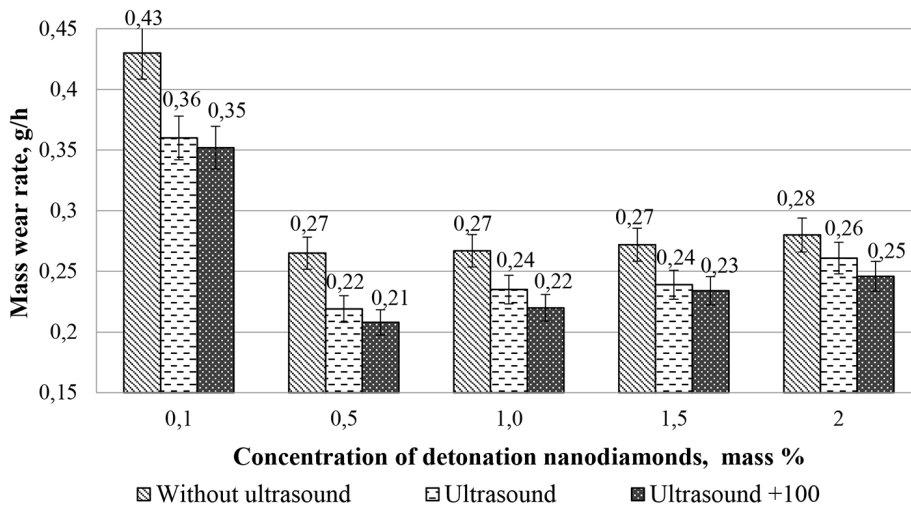


Рис. 4. Зависимость интенсивности массового изнашивания от концентрации детонационных наноалмазов  
 Fig. 4. Dependence of the intensity of mass wear on the concentration of detonation nanodiamonds

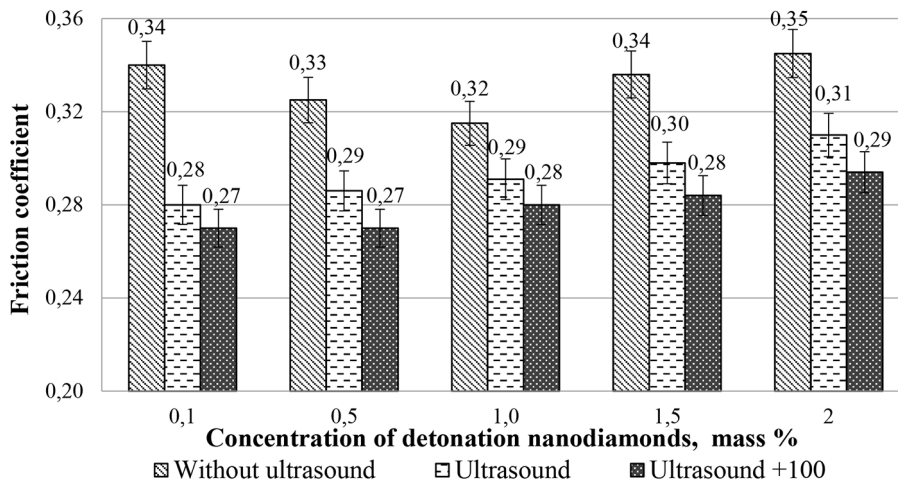


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от концентрации детонационных наноалмазов  
 Fig. 5. Dependence of the coefficient of friction on the concentration of detonation nanodiamonds

Модифицирование политетрафторэтилена детонационными наноалмазами оказывает положительное влияние на триботехнические и механические свойства ПКМ. Снижение коэффициента трения и интенсивности массового изнашивания при применении технологического режима ультразвукового прессования с одновременным наложением низкочастотной модуляции предположительно связано с более равномерным распределением наполнителя в матрице за счет теплового воздействия ультразвуковых колебаний и уплотнением частиц за счет вибрационного воздействия низкочастотной амплитудной модуляции.

### Вывод

На основании проведенных исследований установлено, что модифицирование ПТФЭ детонационными наноалмазами при концентрации 0,5 масс.% является наиболее рациональным для повышения механических свойств и триботехнических характеристик ПКМ.

Определен рациональный технологический режим холодного прессования ПКМ на основе ПТФЭ с применением ультразвукового воздействия частотой 17 кГц и одновременно наложенной низкочастотной амплитудной модуляцией 100 Гц. Время прессования 60 с, усилие 80 МПа.

Применение режима прессования УЗ+100 позволяет повысить механические свойства ПКМ на основе ПТФЭ с наполнителем ДНА: предел прочности при растяжении на 18 %, относительное удлинение на 14 %, модуль упругости на 15 %, а также снизить интенсивность масового изнашивания на 22 % и коэффициент трения на 17 %.

### Список литературы / References

[1] Адаменко Н.А., Больбасов Е.Н., Бузник В.В. *Фторполимерные материалы*, Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук, Томск: НТЛ, 2017, 596 [Adamenko N.A., Bolbasov E.N., Buznik V.V. *Fluoropolymer materials*, Institute of Solution Chemistry named after G. A. Krestov of the Russian Academy of Sciences, Tomsk: Publishing House of scientific and technical literature, 2017, 596 (in Rus.)]

[2] Негров Д.А., Еремин Е.Н., Корусенко П.М., Несов С.Н. Влияние ультразвуковой активации на структурообразование политетрафторэтилена, модифицированного нитридом бора. *Омский научный вестник*, 2017, 1(2), 57–61 [Negrov D.A., Eremin E.N., Korusenko P.M., Nesov S.N. Effect of ultrasonic activation on the structure formation of polytetrafluoroethylene modified with boron nitride. *Omsk Scientific Bulletin*, 2017, 1(2), 57–61 (in Rus.)]

[3] Alam K. I., Doraziao A., Burris D. L. Polymers tribology exposed: eliminating transfer film effects to clarify ultralow wear of PTFE. *Tribology Letters*, 2020, 68(67), 1–13.

[4] Негров Д.А., Путинцев В.Ю., Передельская О.А., Наумова А.В. Технология изготовления деталей узлов трения из полимерных композиционных материалов. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*, 2015, 15(2), 13–19 [Negrov D.A., Putintsev V. Yu., Peredelskaya O. A., Naumova A. V. Manufacturing technology of friction unit parts from polymer composite materials. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering*, 2015, 15(2), 13–19 (in Rus.)].

[5] Панин С.В., Корниенко Л.А., Нгуен Суан Т. Износостойкость композитов на гибридной матрице СВМПЭ-ПТФЭ: механические и триботехнические свойства матрицы. *Трение и износ*, 2015, 36(3), 325–333 [Panin S. V., Kornienko L. A., Nguyen Xuan T. Wear resistance of composites on a hybrid matrix HMPE-PTFE: mechanical and tribotechnical properties of the matrix. *Friction and wear*, 2015, 36(3), 325–333 (in Rus.)].

[6] Негров Д.А., Путинцев В.Ю. Усовершенствование технологии прессования изделий из политетрафторэтилена. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2021, 14(5), 564–571 [Negrov D. A., Putintsev V. Yu. Improvement of pressing technology of products from polytetrafluoroethylene, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2021, 14(5), 564–571 (in Rus.)]

[7] Машков Ю.К., Кропотин О.В., Шилько С.В. Формирование структуры и свойств антифрикционных композитов модификацией политетрафторэтилена полидисперсными наполни-



телями. *Материаловедение*, 2015, 1, 22–25 [Mashkov Yu.K., Kropotin O. V., Shilko S. V. Formation of the structure and properties of antifriction composites modification of polytetrafluoroethylene with polydisperse fillers. *Materials Science*. 2015, 1, 22–25 (in Rus.)]

[8] Lim D.P., Lee J.Y. Lim D.S. Effect of reinforcement particle size on the tribological properties of nanodiamond filled polytetrafluoroethylene based coating. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2009, 9(7), 4197–4201.

[9] Lai S.-Q., Yue L., Li T.-S., Hu Z.-M. The friction and wear properties of polytetrafluoroethylene filled with ultrafine diamond. *Wear*, 2006, 260(4), 462–468.

[10] Стручкова Т.С., Нюрова А.Г., Николаева А.Д. Исследование влияния терморасширенного графита на триботехнические характеристики политетрафторэтилена. *Южно-Сибирский научный вестник*, 2019, 4(28), 303–306. [Struchkova T. S., Nyurova A. G. Nikolaeva A. D. Investigation of the effect of thermally expanded graphite on the tribotechnical characteristics of polytetrafluoroethylene, *South Siberian Scientific Bulletin*, 2019, 4(28), 303–306 (in Rus.)]