



УДК / UDC 67.02:531.44

DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-3-114-122

EDN: UUSEYF

Научная статья / Original article

ВЛИЯНИЕ МОДУЛИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКА НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Д. А. Негров¹, В. Ю. Путинцев¹, С. В. Шилько²,
Е. В. Князев¹, А. И. Глотов¹, Д. А. Вебер¹

¹ Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

² Институт механики металлополимерных систем
имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси,
Беларусь, 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32А

В работе проведено комплексное исследование структуры, механических и триботехнических свойств полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена (фторопласт-4), наполненного многостенными углеродными нанотрубками. Проведены испытания механических и триботехнических свойств и исследована надмолекулярная структура. Установлены закономерности изменения комплекса функциональных характеристик полимерных композиционных материалов в зависимости от концентрации наполнителя и режима технологического процесса изготовления. Предложен и реализован метод холодного прессования с ультразвуковым воздействием при его низкочастотной амплитудной модуляции. Метод обеспечивает интенсификацию деагрегации частиц наполнителя, повышение однородности их распределения и усиление межфазного взаимодействия. Это приводит к более эффективной передаче контактной нагрузки между компонентами полимерного композиционного материала и повышению долговечности трибосопряжения в результате снижения абразивного износа. В частности, применение ультразвукового прессования изучаемого полимерного композиционного материала при содержании 1,5 масс. % нанотрубок обеспечивает повышение предела прочности при растяжении на 10 %, модуля упругости — на 16 % и снижение скорости массового износа на — 15 % по сравнению с традиционной технологией прессования. Полученные результаты свидетельствуют о корреляции параметров режима прессования, структуры и механико-триботехнических свойств, что позволяет получить антифрикционные композиты с повышенной прочностью и износостойкостью.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, многостенные углеродные нанотрубки, поверхность трения, абразивное изнашивание, сухое трение, ультразвук, модуляция.

Для цитирования: Негров Д. А., Путинцев В. Ю., Шилько С. В., Князев Е. В., Глотов А. И., Вебер Д. А. Влияние модулированного ультразвука на формирование структуры, механических и триботехнических свойств композита на основе политетрафторэтилена и многостенных углеродных нанотрубок // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 3. С. 114–122. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-3-114-122. EDN: UUSEYF.



© Негров Д. А., Путинцев В. Ю., Шилько С. В.,
Князев Е. В., Глотов А. И., Вебер Д. А., 2025.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

INFLUENCE OF THE MODULATED ULTRASOUND ON THE STRUCTURE, MECHANICAL AND TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF POLYTETRAFLUOROETHYLENE COMPOSITE AND MULTI-LAYERED CARBON NANOTUBES

D. A. Negrov¹, V. Yu. Putintsev¹, S. V. Shil'ko²,
E. V. Knyazev¹, A. I. Glotov¹, D. A. Veber¹

¹Omsk State Technical University, Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

²V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute
of National Academy of Sciences of Belarus,
Belarus, Gomel, Kirova St., 32 A, 246050

The article presents a comprehensive study of the structure, mechanical, and tribotechnical properties of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene (fluoroplastic-4) filled with multi-walled carbon nanotubes. The mechanical and tribotechnical properties are tested, and the supramolecular structure are investigated. The authors establish the patterns of changes in the complex of functional characteristics of polymer composite materials, depending on the filler concentration and the manufacturing process. A method of cold pressing with ultrasonic exposure and low-frequency amplitude modulation is proposed and implemented. The method provides intensification of the filler particles deaggregation, increasing the homogeneity of their distribution and strengthening the interfacial interaction. Moreover, the method leads to more efficient transfer of the contact load between the polymer composite material components and increase the durability of the tribosystem as a result of reducing the abrasive wear. In particular, the use of ultrasonic pressing, studied by polymer composite material at a content of 1.5 wt. % of nanotubes, the use of ultrasonic pressing provides an increase in the tensile strength by 10 %, the modulus of elasticity by 16 % and a decrease in the mass wear rate by 15 % compared to the traditional pressing technology. The results indicate the correlation of the pressing mode parameters, structure and mechanical- tribotechnical properties, which allow obtaining antifriction composites with increased strength and wear resistance.

Keywords: polytetrafluoroethylene, multiwalled carbon nanotubes, friction surface, abrasive wear, dry friction, ultrasound, modulation.

For citation: Negrov D. A., Putintsev V. Yu., Shil'ko S. V., Knyazev E. V., Glotov A. I., Veber D. A. Influence of the modulated ultrasound on the structure, mechanical and tribotechnical properties of polytetrafluoroethylene composite and multi-layered carbon nanotubes. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 3. P. 114–122. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-3-114-122. EDN: UUSEYF.



© Negrov D. A., Putintsev V. Yu., Shil'ko S. V.,
Knyazev E. V., Glotov A. I., Veber D. A., 2025.

The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

С момента первого наблюдения углеродных нанотрубок в конце XX в. интерес научного сообщества к этим наноструктурным материалам неуклонно растет. Развитие технологий производства углеродных нанотрубок позволило получить их многочисленные модификации с различной структурой и свойствами. Сегодня наибольший интерес представляют многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ). При диаметре от 1 до 20 нм и длине порядка микрона они обладают уникальным сочетанием высоких значений предела механической прочности, значительного модуля упругости, химической и термической стабильностью, а также энерго- и теплопроводности, что сделало МУНТ объектом интенсивных фундаментальных и прикладных исследований в различных областях [1–3]. В настоящее время наблюдается тенденция ежегодного увеличения производства нанотрубок в промыш-

ленных масштабах, обусловленная перспективностью их широкого применения в полупроводниках, хранения водорода, источников излучения, в том числе в качестве наполнителя полимерных композиционных материалов (ПКМ) [4–6].

Среди множества промышленно изготавливаемых композитов материалы на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) наиболее часто применяются для изготовления деталей узлов трения, включая подшипники скольжения, вакуумные уплотнения, направляющие скольжения и др. Эффект самосмазывания с низким и стабильным коэффициентом трения наряду с химической инертностью позволяет применять политетрафторэтилен в машиностроении и нефтехимической промышленности при трении в несмазываемых узлах трения [7–8]. Вместе с тем из-за относительно низкой теплопроводности указанного полимера имеет место быть значительное повышение температуры в контакте, что сопро-

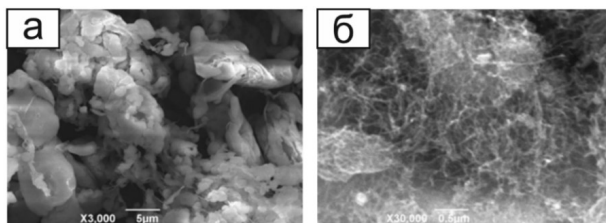


Рис. 1. Изображения компонентов, полученные сканирующей электронной микроскопией:
а — тонкомолотый суспензионный порошок ПТФЭ;
б — многостенные углеродные нанотрубки
Fig. 1. Images of components obtained by scanning electron microscopy: a — finely ground PTFE suspension powder; b — multi-walled carbon nanotubes

вождается заметным ростом коэффициента трения, интенсивности изнашивания и уменьшением долговечности узла трения. Добавление в ПТФЭ высокопроводящих углеродных материалов в виде графита и кокса является известным способом повышения теплопроводности, упрочнения и снижения интенсивности изнашивания базового ПТФЭ [9–14]. Поскольку МУНТ обладают высокой повышенной теплопроводностью наряду с механической, ожидается, что они значительно улучшат свойства композитов на основе ПТФЭ. В различных исследованиях было доказано, что наноразмерные наполнители по эффективности соответствуют или превосходят микроразмерные наполнители в снижении скорости износа на 3–4 порядка при значительно меньшей доле наполнения [14–16].

Наиболее распространённым технологическим способом промышленного получения композиционных материалов на основе ПТФЭ является холодное прессование порошковой заготовки с последующим термическим воздействием, как правило спеканием и контролируемым медленным охлаждением [17–18]. В процессе прессования полимерные частицы подвергаются пластической деформации и уплотнению, благодаря чему пористость объема композиционной смеси снижается. Повышение эффективности процесса прессования может быть достигнуто применением ультразвукового (УЗ) воздействия с одновременно наложенной низкочастотной амплитудной модуляцией [18–20]. Воздействие на частицы знакопеременных нагрузок с ультразвуковой частотой снижает трение между частицами прессуемой смеси и позволяет повысить однородность и плотность получаемого материала, способствуя улучшению его механических и антифрикционных свойств полимерных композитов [21].

Цель исследования — определить влияние концентрации углеродного наноразмерного наполнителя, вводимого в ПТФЭ-матрицу в условиях ультразвукового прессования с модуляцией, на эксплуатационные характеристики получаемых композиционных материалов.

Основная часть

Объект исследования — уплотнительные кольца поршневых компрессоров. В качестве основного материала для изготовления образцов был взят двухкомпонентный композит на основе тонкомолотого суспензионного порошка ПТФЭ марки RX015 со средней дисперсностью частиц до 20 мкм (рис. 1а), модифицированный многостенными углеродными нанотрубками (МУНТ) диаметром частиц до 30 нм, длиной до 20 мкм, марки МУНТ-2 (рис. 1б).

Таблица 1. Состав композиционного материала на основе ПТФЭ

Table 1. Composition and content of PTFE-based components

Композиция	Концентрация компонентов, масс. %	
	ПТФЭ	МУНТ
ПТФЭ	100	0
ПТФЭ 0,5	99,5	0,5
ПТФЭ 1	99	1
ПТФЭ 1,5	98,5	1,5
ПТФЭ 2	98	2
ПТФЭ 2,5	97,5	2,5

Для получения композитов частицы ПТФЭ подвергались предварительной дегидратации в вакуумном сушильном шкафу при температуре 150 °С в течение 240 мин., что позволило удалить остаточную влагу, существенно влияющую на качество и эффективность последующей модификации многостенными углеродными нанотрубками.

Для достижения в композиционном материале оптимального размера ПТФЭ было проведено измельчение материала в ножевой мельнице марки DM-6 в течение 120 с с частотой вращения до 400 с⁻¹, что обеспечило достижение необходимой дисперсности частиц ПТФЭ. Кроме того, в процессе измельчения полимер и наполнитель перемешивались, образуя однородную смесь.

Прессование композитных материалов осуществлялось на специализированной установке, включающей гидравлический пресс модели ГМС-50, обладающий максимальной рабочей нагрузкой в 500 кН. Данная установка была интегрирована с ультразвуковым генератором УЗГ-6, создающим УЗ колебания до 23 кГц с возможностью их амплитудной модуляции.

Прессование образцов происходило при стандартной комнатной температуре, при этом применялось статическое давление в 80 МПа на протяжении одной минуты. В рамках данного научного исследования были реализованы два экспериментальных подхода, каждый из которых имел технологические особенности. Первый режим прессования, обозначенный как «Без УЗ», характеризовался полным отсутствием внешнего энергетического воздействия, и использовался для изучения свойств образцов, полученных традиционным методом прессования. Второй режим прессования, обозначенный как УЗ+100, включал в себя ультразвуковые колебания с частотой 17 кГц, которые были наложены с низкочастотной модуляцией, имеющей частоту 0,1 кГц, что позволило исследовать влияние усовершенствованного режима на структурные изменения в материале.

Для исследования были приготовлены образцы шести составов, различающихся содержанием наполнителя (табл. 1).

Спекание композиционных образцов осуществлялось посредством постепенного нагрева до температуры 360 °С и с контролируемой скоростью 2 °С/мин. При достижении требуемого температурного режима осуществлялась выдержка, продолжительность которой рассчитывалась исходя из соотношения 9 мин. на каждый миллиметр максимального поперечного сечения образца. Далее, в технологии изготовления был проведен контро-

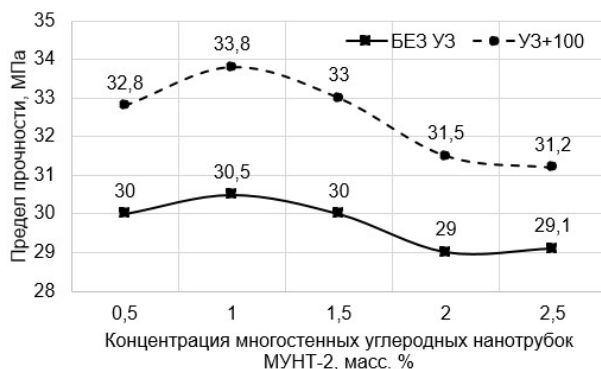


Рис. 2. Зависимость предела прочности от концентрации МУНТ и режима прессования
Fig. 2. Dependence of the tensile strength on the concentration of the CNT and the pressing mode

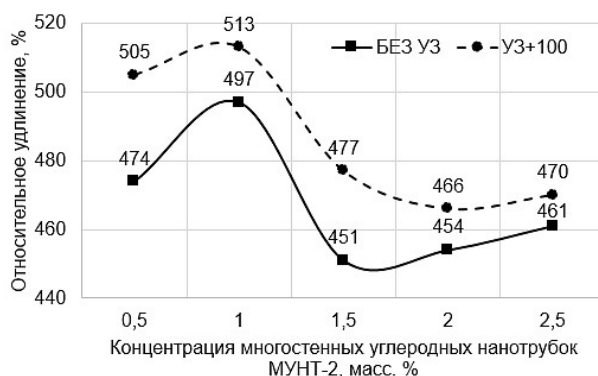


Рис. 3. Зависимость относительного удлинения от концентрации МУНТ и режима прессования
Fig. 3. Dependence of the relative elongation on the concentration of the CNT and the pressing mode

лируемый процесс охлаждения температуры материала до 327°C, осуществляемый с постоянной скоростью 0,5°C в минуту. При достижении указанного температурного порога был инициирован этап медленного охлаждения, который продолжался до тех пор, пока материал не охладился до комнатной температуры.

Исследование морфологии и надмолекулярной структуры полимерных композиционных материалов осуществлялось методом анализа поверхности скола. Образцы подготавливались режимом низкотемпературного хрупкого излома, проводимого при температуре жидкого азота. Комплексный морфологический анализ образцов был осуществлен с применением сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) модели JEOL JCM-5700. Рельеф поверхности трения образцов был исследован на оптическом микроскопе SIAMS-MT45.

Модуль упругости E , МПа и предел прочности σ , МПа при растяжении, а также относительное удлинение при разрыве δ , % определялись на образцах в виде лопаток при комнатной температуре на машине для механических испытаний Zwick Roell BT2 в соответствии с рекомендациями ГОСТ 11262–2017 и ГОСТ 25.601–80. Скорость деформирования составляла 100 мм/мин.

Определение триботехнических характеристик (J — интенсивность массового изнашивания, г/ч; f — коэффициент трения) проводилось на машине трения УМТ-2168 при нормальной нагрузке 471 Н,

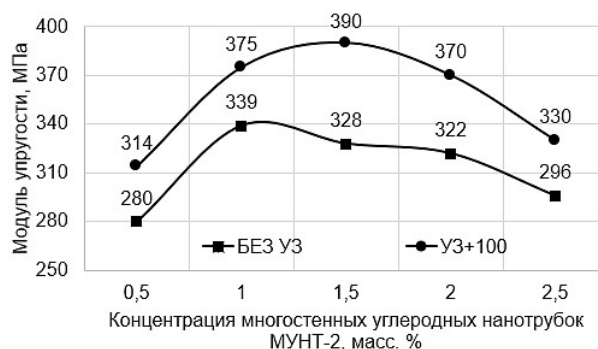


Рис. 4. Зависимость модуля упругости от концентрации МУНТ и режима прессования
Fig. 4. Dependence of the elastic modulus on the concentration of the CNT and the pressing mode

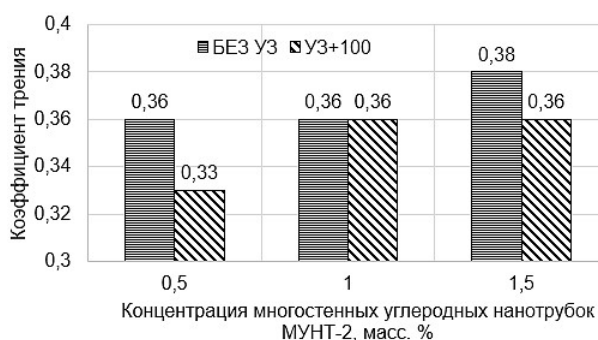


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от концентрации МУНТ и режима прессования
Fig. 5. Dependence of the friction coefficient on the concentration of the CNT and the pressing mode

линейной скорости скольжения 0,75 м/с и продолжительности испытания 180 мин.

Для определения оптимального состава ПКМ испытывались серии образцов с различным содержанием наполнителя, изготовленные при использовании двух вышеперечисленных режимов прессования. На рис. 2 приведены зависимости предела прочности от концентрации углеродных нанотрубок и режимов прессования.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что максимальная величина предела прочности при растяжении, достигающая ~34 МПа, была зафиксирована для образцов, содержащих 1 масс. % углеродных нанотрубок, подвергнутых прессованию с использованием ультразвуковых колебаний и низкочастотной модуляции. Данное значение на 10 % выше, чем аналогичные показатели, характерные для образцов, изготовленных с применением традиционной методики холодного прессования.

Зависимость относительного удлинения ПКМ от концентрации наполнителя имеет четко выраженный максимум при 1 масс. %. В частности, режим УЗ+100 позволил повысить относительное удлинение на 3 % по сравнению с традиционным прессованием без ультразвукового воздействия (рис. 3). Явная тенденция к росту относительного удлинения после минимума при 1,5 масс. % предположительно обусловлена комплексным воздействием нанотрубок на морфологическую и физико-механическую структуру ПТФЭ. Введение углеродных нанотрубок (УНТ) в полимерную матрицу может

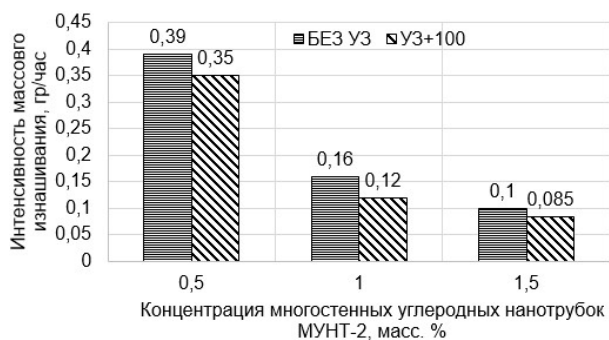


Рис. 6. Зависимость интенсивности массового изнашивания от концентрации МУНТ и режима прессования
Fig. 6. Dependence of the mass wear intensity on the concentration of the CNT and the pressing mode

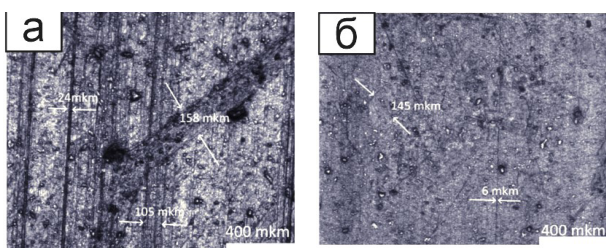


Рис. 7. Оптические микроскопические изображения поверхности трения образцов композитов на основе ПТФЭ с УНТ в концентрации 1,5 масс. %:
а — режим холодного прессования;
б — режим УЗ+100 прессования

Fig. 7. Optical microscopic images of the friction surface based on PTFE with the CNT at a mass fraction of 1.5 %:
а — cold pressing mode; б — US+100 pressing mode

служить эффективными центрами кристаллизации, способствуя формированию более упорядоченных кристаллических фаз в объеме ПТФЭ. Исследование данного явления находится на начальной стадии и требует более глубокого анализа.

Максимальное значение модуля упругости ПКМ, равное ~390 МПа, соответствует концентрации углеродных нанотрубок 1,5 масс. % и режиму прессования УЗ+100 (рис. 4). Это на 18 % больше модуля упругости ПТФЭ композита, полученного прессованием по традиционной технологии.

Полученные результаты учитывались при проведении трибоиспытаний, для которых были взяты композиты, содержащие 0,5, 1 и 1,5 масс. % углеродных нанотрубок и имеющие лучшие деформационно-прочностные характеристики.

Из рис. 5 видно, что коэффициент трения изучаемых ПТФЭ композитов при изменении концентрации нанотрубок в вышеуказанных пределах варьируется в узком диапазоне 0,33...0,38. Композитные материалы, содержащие 1,5 масс. % МУНТ (рис. 6), по сравнению с традиционными методами прессования, применение ультразвукового прессования с модуляцией позволяет снизить интенсивность изнашивания на 15 %.

Для определения причин снижения массового изнашивания была выполнена оптическая микроскопия поверхности трения композитов с концентрацией наполнителя 1,5 масс. %, полученных при различных технологических режимах (рис. 7). Изображения поверхностей трения материалов указывают на различные механизмы изнашивания:

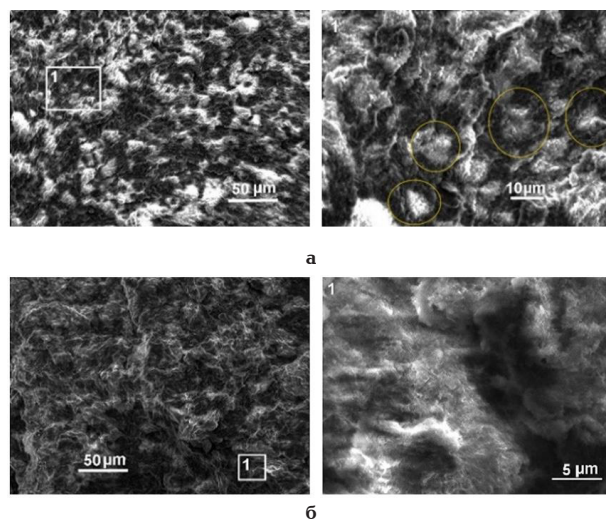


Рис. 8. Микрофотографии разрушения образцов полимерных композитов на основе ПТФЭ, наполненного УНТ 1,5 масс. %: а — традиционный режим холодного прессования; б — режим прессования УЗ+100
Fig. 8. Micrographs of the destruction of polymer composites based on PTFE filled with the CNT at a mass fraction of 1.5 %: а — traditional cold pressing mode; б — US+100 pressing mode

на поверхности трения ПКМ, где присутствует множество ориентированных царапин с четкими границами и толщиной от 25 до 150 мкм (рис. 7а). Это свидетельствует об интенсивном абразивном износе поверхности трения, что, вероятно, обусловлено недостаточной связью наполнителя с полимерной матрицей и отделением фрагментов композитной структуры, приводящему к интенсификации изнашивания.

На поверхности трения композитного материала, полученного прессованием при воздействии модулированного ультразвука, следы абразивного износа становятся менее заметными. Толщина наблюдаемых царапин не превышает 6–10 мкм. В то же время на поверхности трения наблюдаются участки, соответствующие адгезионному износу поверхности (рис. 7б). В целом, режим УЗ+100 приводит к увеличению взаимодействия частиц наполнителя с полимерной матрицей, уменьшению роли абразивного механизма и, соответственно, интенсивности изнашивания изучаемого ПКМ.

На рис. 8 представлены СЭМ-изображения, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии излома композита при различных режимах прессования. СЭМ-изображение структуры излома образца ПКМ с содержанием УНТ 1,5 масс. %, сформированного по стандартной технологии холодного прессования, показано на рис. 8а. На изображении излома видно множество больших ярких областей размером примерно от 10...50 мкм. Яркость этих областей может быть объяснена высоким электрическим сопротивлением частиц ПТФЭ. Промежуточное пространство между областями яркости обладает лучшей проводимостью, что может быть объяснено повышенной концентрацией распределения УНТ в этих областях. УНТ, полученные традиционным методом холодного прессования, имеют неоднородную структуру, содержащую области с различным распределением наполнителя.

В случае использования технологического режима с амплитудной модуляцией ультразвука во время прессования (рис. 8б) не были обнаруже-

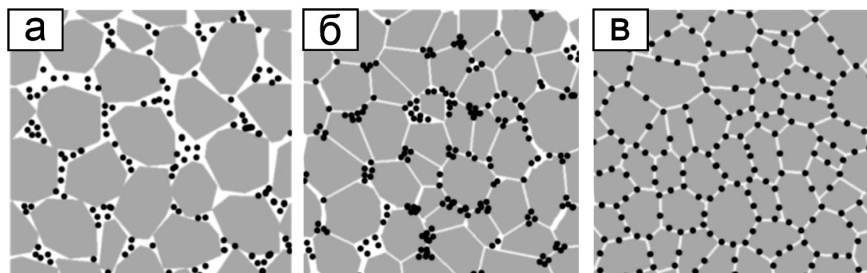


Рис. 9. Схема распределения частиц ПТФЭ и наполнителей в процессе прессования: а — частицы ПТФЭ (серые зерна) и частицы наполнителя (черные точки) перед прессованием; б — частицы ПТФЭ (серые зерна) и частицы наполнителя (черные точки) после холодного прессования; в — частицы ПТФЭ (серые зерна) и частицы наполнителя (черные точки) после прессования в режиме УЗ+100.

Fig. 9. Distribution of PTFE and filler particles during the pressing process:

- а — PTFE particles (gray grains) and filler particles (black dots) before pressing;
б — PTFE particles (gray grains) and filler particles (black dots) after cold pressing;
в — PTFE particles (gray grains) and filler particles (black dots) after pressing at the US+100 mode

ны области, которые могут быть связаны с частицами ПТФЭ. Наполнители были равномерно распределены по объему композита.

Полученные результаты свидетельствуют об улучшении механических и антифрикционных свойств политетрафторэтилена при его наполнении многостенными углеродными нанотрубками, что обусловлено известным эффектом упрочнения [22, 23]. Режимы дополнительного энергетического воздействия, используемые в процессе прессования, значительно способствуют повышению эксплуатационных свойств композитов на основе ПТФЭ. В случае ПТФЭ, спрессованного без наполнителя режимом и без УЗ прессования, при загрузке частицы ПТФЭ сближаются, что сопровождается увеличением плотности порошка и уменьшением объема.

Однако при взаимодействии частиц друг с другом на их границах возникают силы трения, что препятствует уплотнению частиц порошка. Это может привести к образованию микропустот в структуре после процедуры прессования [23]. При дополнительном ультразвуковом воздействии во время прессования частицы ПТФЭ передают колебательное движение, что уменьшает трение на границах частиц и способствует образованию более плотной структуры после прессования.

В случае полимерных композитов на основе ПТФЭ и наполнителей полученные результаты можно интерпретировать с точки зрения процессов, происходящих при заполнении формы во время приложения дополнительной энергии (рис. 9). Перед процессом прессования форма заполняется порошком, состоящим из смеси частиц ПТФЭ и наполнителя. В то же время между частицами ПТФЭ остается большое пространство, в котором скапливаются частицы наполнителя.

В процессе холодного прессования прикладывается значительное давление, частицы порошка смыкаются, пространство между ними уменьшается, и агломераты наполнителя втискиваются между частицами ПТФЭ (рис. 9б). После спекания образуется неоднородная структура, состоящая из больших участков без наполнителя. Под воздействием вибрации пуансона форма частиц порошка также колеблется. При этом частицы перемещаются, встряхиваются и укладываются в стопку. Частицы наполнителя распределяются и вклиниваются вдоль границ между крупными частицами (рис. 9в), что

способствует уплотнению и увеличивает количество контактов между частицами. При воздействии низкочастотных вибраций внешнее трение полимера относительно вибрирующей поверхности уменьшается. В процессе вибрационного формования порошкообразный полимер получает периодические импульсы, которые вызывают случайные колебания, приводящие к уплотнению отдельных частиц, что впоследствии, в процессе спекания, способствует появлению однородной непористой массы с высокой структурной прочностью и тем самым повышает износостойкость композитов.

Описанная модель хорошо коррелирует с экспериментальными данными. Изображения поверхностей трения, полученные методом оптической микроскопии, показывают, что размер царапин уменьшается при абразивном износе при применении технологических режимов прессования УЗ+100. Более того, СЭМ-изображения сколов композитов показывают, что количество и размер частиц ПТФЭ в структуре композита уменьшаются. Это положительно влияет на износостойкость композитов при трении.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что введение дополнительных вибрационных воздействий в технологические режимы прессования положительно сказывается на взаимодействии частиц наполнителя с матрицей и последующими структурно-фазовыми превращениями, происходящими в процессе спекания.

Заключение

По результатам проведенных исследований получены следующие выводы:

1. Установлено рациональное содержание многостенных углеродных нанотрубок в политетрафторэтилене на уровне 1,5 масс. %, при котором достигается оптимальный баланс механических и триботехнических характеристик композиционного материала.

2. Применение режима ультразвукового прессования с наложенной низкочастотной амплитудной модуляцией (УЗ+100) при формировании ПТФЭ-композитов, содержащих 1,5 масс. % многостенных углеродных нанотрубок, обеспечивает прирост предела прочности при растяжении на 10%, увеличение модуля упругости на 16 % и снижение интенсивности массового изнашивания на 15 % по сравнению с традиционной технологией изготовления.

3. Применение технологического режима УЗ+100 способствует деагрегации частиц наполнителя и повышению равномерности распределения, а также измельчению и более плотной укладке частиц полимерной матрицы. Наблюдается усиление межфазного сцепления на границе ПТФЭ-УНТ, что повышает эффективность передачи нагрузки в приповерхностных слоях композита.

Финансирование / Funding

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSGF-2024-0003.

The study was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Project No. FSGF-2024-0003.

Список источников / References

1. Shoukat R., Khan M. I. Carbon nanotubes: a review on properties, synthesis methods and applications in micro and nanotechnology. *Microsystem Technologies*. 2021. Vol. 27, no. 12. P. 4183–4192. DOI: 10.1007/s00542-021-05211-6.
2. Anzar N., Hasan R., Tyagi M., Narang J. Carbon nanotube — a review on synthesis, properties and plethora of applications in the field of biomedical science. *Sensors International*. 2020. Vol. 1. P. 100003. DOI: 10.1016/j.sintl.2020.100003.
3. Томишко М. М., Демичева О. В., Алексеев А. М. [и др.]. Многослойные углеродные нанотрубки и их применение // Российский химический журнал. 2008. Т. 52, № 5. С. 39–42. EDN: JWDTRT.
4. Tomishko M. M., Demicheva O. V., Alekseev A. M. [et al.] Multisloynnye uglerodnnye nanotrubki i ikh primeneniye [Multiwall carbon nanotubes and their applications]. *Rossiyskiy Khimicheskiy Zhurnal*. 2008. Vol. 52, no. 5. P. 39–42. EDN: JWDTRT. (In Russ.).
4. Zhang X., Lu W., Zhou G., Li Q. Understanding the mechanical and conductive properties of carbon nanotube fibers for smart electronics. *Advanced Materials*. 2020. Vol. 32, no. 5. P. 1902028. DOI: 10.1002/adma.201902028.
5. Gupta N., Gupta S. M., Sharma S. K. Carbon nanotubes: synthesis, properties and engineering applications. *Carbon Letters*. 2019. Vol. 29, no. 5. P. 419–447. DOI: 10.1007/s42823-019-00068-2.
6. Бадамшина Э. Р., Гафурова М. П., Эстрин Я. И. Модифицирование углеродных нанотрубок и синтез полимерных композитов с их участием // Успехи химии. 2010. Т. 79, № 11. С. 1027–1064. EDN: MVWYTB.
7. Badamshina E. R., Gafurova M. P., Estrin Ya. I. Modifitsirovaniye uglerodnnykh nanotrubok i sintez polimernykh kompozitov s ikh uchastiem [Modification of carbon nanotubes and synthesis of polymeric composites involving the nanotubes]. *Uspekhi Khimii*. 2010. Vol. 79, no. 11. P. 1027–1064. EDN: MVWYTB. (In Russ.).
7. Истомин Н. П., Семенов А. П. Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе фторполимеров. Москва: Наука, 1981. 146 с.
8. Istomin N. P., Semenov A. P. Antifriktsionnyye svoystva kompozitsionnykh materialov na osnove ftorpolimerov [Antifriction properties of composite materials based on fluoropolymers]. Moscow, 1981. 146 p. (In Russ.).
8. Адаменко Н. А., Большасов Е. Н., Бузник В. В. [и др.]. Фторполимерные материалы. Томск: Изд-во НТЛ, 2017. 596 с. ISBN 978-5-89503-596-2.
9. Adamenko N. A., Bolbasov E. N., Buznik V. V. [et al.] Ftorpolimernyye materialy [Fluoropolymer materials]. Tomsk, 2017. 596 p. ISBN 978-5-89503-596-2. (In Russ.).
9. Alam K. I., Dorazio A., Burris D. L. Polymers tribology exposed: eliminating transfer film effects to clarify ultralow wear of PTFE. *Tribology Letters*. 2020. Vol. 68 (2). P. 1–13. DOI: 10.1007/s11249-020-01306-9.
10. 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*. 2011. Vol. 71. P. 219–230. DOI: 10.2495/SECM110191.
11. Сученинов П. А., Адаменко Н. А., Сергеев Д. В. Разработка и исследование композиционных материалов для уплотнений воздушных поршневых компрессоров // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2009. № 11. С. 66–69. EDN: KYAJXX.
12. Sucheninov P. A., Adamenko N. A., Sergeev D. V. Razrabotka i issledovanie kompozitsionnykh materialov dlya uplotneniy vozdushnykh porshnevnykh kompressorov [Development and research of composite materials for seals of air piston compressors]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Izvestia VSTU*. 2009. No. 11. P. 66–69. EDN: KYAJXX. (In Russ.).
12. Гракович П. Н., Шелестова В. А., Данченко С. Г., Жандаров С. Ф. [и др.]. Проблемы применения композиционных материалов «Флувис» и «Суперфлувис» в компрессоростроении // Технические газы. 2013. № 3. С. 69–72. EDN: RSRNUJ.
13. Grakovich P. N., Shelestova V. A., Danchenko S. G., Zhandarov S. F. [et al.] Problemy primeneniya kompozitsionnykh materialov "Fluvis" i "Superfluvis" v kompressorostroenii [The problems of application of composite materials Fluvis and Superfluvis in the compressor engineering]. *Tekhnicheskie Gazy*. 2013. No. 3. P. 69–72. EDN: RSRNUJ. (In Russ.).
13. Охлопкова А. А., Петрова П. Н., Гоголева О. В., Парникова А. Г. Разработка технологических приемов управления свойствами композитов на основе политетрафторэтилена, содержащих наномодификаторы // Вопросы материаловедения. 2013. № 1 (73). С. 136–145. EDN: PZELHH.
14. Okhlopkova A. A., Petrova P. N., Gogoleva O. V., Parnikova A. G. Razrabotka tekhnologicheskikh priemov upravleniya svoystvami kompozitov na osnove politetrafluoretilena, soderzhashchikh nanomodifikatory [Development of technological methods of controlling of composites' properties based on polytetrafluoroethylene, containing nanomodifiers]. *Voprosy Materialovedeniya*. 2013. No. 1 (73). P. 136–145. EDN: PZELHH. (In Russ.).
14. Панин С. В., Корниенко Л. А., Нгуен Суан Т. [и др.]. Механические и триботехнические характеристики нано- и микрокомпозитов на основе полимер-полимерной матрицы СВМПЭ-ПТФЭ // Трение и износ. 2015. № 6. С. 652–660. EDN: VINNSB.
15. Panin S. V., Korniyenko L. A., Nguyen Suan T. [et al.] Mekhanicheskiye i tribotekhnicheskiye kharakteristiki nano- i mikrokompozitov na osnove polimer-polimernoy matritsy SVMPE-PTFE [Mechanical and tribological characteristics of nano- and microcomposites with UHMWPE-PTFE polymer-polymer matrix]. *Treniye i iznos. Journal of Friction and Wear*. 2015. No. 6. P. 652–660. EDN: VINNSB. (In Russ.).
15. Машков Ю. К., Байбарацкая М. Ю., Кургузова О. А. Влияние условий эксплуатации на износостойкость нанокомпозитов на основе политетрафторэтилена // Наука и военная безопасность. 2021. № 2 (25). С. 78–83. EDN: VSKEYS.
16. Mashkov Yu. K., Baybaratskaya M. Yu., Kurguzova O. A. Vliyaniye usloviy ekspluatatsii na iznosostoykost' nanokompozitov na osnove politetrafluoretilena [Influence of operating conditions on the wear resistance of nanocomposites based on polytetrafluoroethylene]. *Nauka i Voennoy Bezopasnost'*. 2021. No. 2 (25). P. 78–83. EDN: VSKEYS. (In Russ.).
16. Song J., Lei H., Zhao G. Improved mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene reinforced by carbon nanotubes. A molecular dynamics study. *Computational Materials Science*. 2019. Vol. 168. P. 131–136. DOI: 10.1016/j.commatsci.2019.05.058.

17. Пат. 2546161 C2 Российская Федерация, МПК С 08 J 5/00, В 29 С 43/56, В 29 С 69/00. Способ изготовления изделий из полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена и устройство для изготовления изделий / Машков Ю. К., Кропотин О. В., Егорова В. А., Кургузова О. А. № 2013125074/05; заявл. 29.05.2013; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10.

Patent 2546161 C2 Russian Federation, IPC C 08 J 5/00, B 29 C 43/56, B 29 C 69/00. Sposob izgotovleniya izdeliy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov na osnove politetrafluoretilena i ustroystvo dlya izgotovleniya izdeliy [Method to manufacture items from polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene and device for manufacturing of items] / Mashkov Yu. K., Kropotin O. V., Egorova V. A., Kurguzova O. A. No. 2013125074/05. (In Russ.).

18. Kornopol'tsev N. V., Rogov V. E., Lenskaya E. V., Kornopol'tsev V. N. Development of materials and coatings based on polytetrafluoroethylene. *Chemistry for Sustainable Development*. 2004. Vol. 12, no. 6. P. 681–686. EDN: HRUJUL.

19. Негров Д. А., Путинцев В. Ю., Глотов А. И. Влияние усовершенствованной технологии прессования на структурообразование политетрафторэтилена // Ползуновский вестник. 2024. № 1. С. 240–244. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.031. EDN: JCAATM.

Negrov D. A., Putintsev V. Yu., Glotov A. I. Vliyaniye usovershenstvovannoy tekhnologii pressovaniya na strukturoobrazovaniye politetrafluoretilena [Impact of improved technology pressing on structure formation polytetrafluoroethylene]. *Polzunovskiy Vestnik*. 2024. No. 1. P. 240–244. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.031. EDN: JCAATM. (In Russ.).

20. Qu H., Wen Z., Qu J., Song B. Study on effects of ultrasonic vibration on sliding friction properties of PTFE composites phosphor bronze under vacuum. *Vacuum*. 2019. Vol. 164. P. 1–6. DOI: 10.1016/j.vacuum.2019.02.022.

21. 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. EDN: TOAMEW.

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*. 2021. No. 4. P. 140–145. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.018. EDN: TOAMEW. (In Russ.).

22. Katiyar J. K., Sinha S. K., Kumar A. Effects of carbon fillers on the tribological and mechanical properties of an epoxy-based polymer (SU-8). *Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces*. 2016. Vol. 10, no. 1. P. 33–44. DOI: 10.1080/17515831.2015.1126689.

23. Makowiec M. E., Blanchet T. A. Improved wear resistance of nanotube-and other carbon-filled PTFE composites. *Wear*. 2017. Vol. 374, no. 6. P. 77–85. DOI: 10.1016/j.wear.2016.12.027.

НЕГРОВ Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Материаловедение и технологии материалов» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 684462

ORCID: 0000-0002-5713-5470

AuthorID (SCOPUS): 54959361600

ResearcherID: D-8411-2019

Адрес для переписки: negrov_d_a@mail.ru

ПУТИНЦЕВ Виталий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и технологии материалов» ОмГТУ, г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 827297

ORCID: 0000-0002-2003-0819

AuthorID (SCOPUS): 57203584921

ResearcherID: Z-1795-2019

Адрес для переписки: putintsev_vit@mail.ru

ШИЛЬКО Сергей Викторович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Механика композитов и биополимеров» Института механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель, Беларусь.

AuthorID (РИНЦ): 481434

ORCID: 0000-0002-9567-2808

AuthorID (SCOPUS): 6602552174

ResearcherID: AIA-6998-2022

Адрес для переписки: shilko_mpri@mail.ru

КНЯЗЕВ Егор Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и технологии материалов» ОмГТУ, г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 666119

ORCID: 0000-0001-6450-5364

AuthorID (SCOPUS): 55657278600

ResearcherID: AAU-4486-2020

Адрес для переписки: knyazevyegor@mail.ru

ГЛОТОВ Алексей Игоревич, аспирант кафедры «Материаловедение и технологии материалов» ОмГТУ, г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 1189428

ORCID: 0009-0005-4722-1278

ResearcherID: JZT-6618-2024

Адрес для переписки: aiglотов@omgtu.ru

ВЕБЕР Денис Александрович, аспирант кафедры «Материаловедение и технологии материалов» ОмГТУ, г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 112315

ResearcherID: OHT-1810-2025

Адрес для переписки: den.veber.19@bk.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 15.08.2025; одобрена после рецензирования 25.09.2025; принята к публикации 15.10.2025.

NEGROV Dmitriy Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Materials Science and Materials Technology Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

AuthorID (RSCI): 684462

ORCID: 0000-0002-5713-5470

AuthorID (SCOPUS): 54959361600

ResearcherID: D-8411-2019

Correspondence address: negrov_d_a@mail.ru

PUTINTSEV Vitaliy Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Materials Science and Materials Technology Department, OmSTU, Omsk.

AuthorID (RSCI): 827297

ORCID: 0000-0002-2003-0819

AuthorID (SCOPUS): 57203584921

ResearcherID: Z-1795-2019

Correspondence address: putintsev_vit@mail.ru

SHIL'KO Sergey Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Head of the Mechanics of Composites and Biopolymers Laboratory, V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus.

AuthorID (RSCI): 481434

ORCID: 0000-0002-9567-2808

AuthorID (SCOPUS): 6602552174

ResearcherID: AIA-6998-2022

Correspondence address: shilko_mpri@mail.ru

KNYAZEV Egor Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Materials Science and Materials Technology Department, OmSTU, Omsk.

AuthorID (RSCI): 666119

ORCID: 0000-0001-6450-5364

AuthorID (SCOPUS): 55657278600

ResearcherID: AAU-4486-2020

Correspondence address: knyazevyegor@mail.ru

GLOTOV Aleksey Igorevich, Postgraduate of the Materials Science and Materials Technology Department, OmSTU, Omsk.

AuthorID (RSCI): 1189428

ORCID: 0009-0005-4722-1278

ResearcherID: JZT-6618-2024

Correspondence address: aiglotov@omgtu.ru

VEBER Denis Aleksandrovich, Postgraduate of the Materials Science and Materials Technology Department, OmSTU, Omsk.

AuthorID (RSCI): 112315

ResearcherID: OHT-1810-2025

Correspondence address: den.veber.19@bk.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 15.08.2025; approved after reviewing 25.09.2025; accepted for publication 15.10.2025.