



Научная статья  
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)  
УДК 534-16: 531.44: 621.9.048.6  
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.031

EDN: JCAATM

## ВЛИЯНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕССОВАНИЯ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Дмитрий Анатольевич Негров<sup>1</sup>, Виталий Юрьевич Путинцев<sup>2</sup>,  
Алексей Игоревич Глотов<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Омский государственный технический университет, Омск, Россия

<sup>1</sup> negrov\_d\_a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5713-5470>

<sup>2</sup> putintsev\_vit@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2003-0819>

<sup>3</sup> aiglotov@omgtu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4722-1278>

**Аннотация.** В статье рассмотрено улучшение технологического процесса прессования политетрафторэтилена с целью повышения его эксплуатационных свойств, долговечности и износостойкости для использования в полимерных композиционных материалах, применяемых в деталях различных узлов трения. Проведено сравнение влияния технологических режимов прессования на механические свойства, триботехнические характеристики, рельеф поверхности трения, а также на надмолекулярную структуру политетрафторэтилена.

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, позволяет повысить предел прочности при растяжении на 9 %, относительное удлинение на 9 %, модуль упругости на 6 % и снизить интенсивность массового изнашивания на 22 %, коэффициент трения на 24 %. Использование низкочастотной модуляции приводит к изменению рельефа поверхности трения и к получению более равномерной, упорядоченной и однородной структуры ПТФЭ.

**Ключевые слова:** политетрафторэтилен, низкочастотная модуляция, ультразвуковое воздействие, свойства, структура.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ № FSGF-2024-0003.

**Для цитирования:** 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: <https://elibrary.ru/JCAATM>.

Original article

## IMPACT OF IMPROVED TECHNOLOGYPRESSING ON STRUCTURE FORMATION POLYTETRAFLUOROETHYLENE

Dmitriy A. Negrov<sup>1</sup>, Vitaliy Yu. Putintsev<sup>2</sup>, Alexey Ig. Glotov<sup>3</sup>

<sup>1, 2</sup> Omsk State Technical University, Omsk, Russia

<sup>1</sup> negrov\_d\_a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5713-5470>

<sup>2</sup> putintsev\_vit@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2003-0819>

<sup>3</sup> aiglotov@omgtu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4722-1278>

**Abstract.** The article discusses the improvement of the technological process of pressing polytetrafluoroethylene, with the aim of increasing its performance properties, durability and wear resistance for use in polymer composite materials used in parts of various friction units. A comparison was made of the influence of technological pressing modes on mechanical properties, tribotechnical characteristics, friction surface relief, as well as on the supramolecular structure of polytetrafluoroethylene.

© Негров Д. А., Путинцев В. Ю., Глотов А. И., 2024

## ВЛИЯНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕССОВАНИЯ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

*As a result of research, it was established 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 allows increasing the tensile strength by 9%, relative elongation by 9%, modulus elasticity by 6% and reduce the intensity of mass wear by 22%, friction coefficient by 24%. The use of low-frequency modulation leads to a change in the relief of the friction surface and to obtaining a more uniform, ordered and homogeneous PTFE structure.*

**Keywords:** polytetrafluoroethylene, low-frequency modulation, ultrasonic effect, properties, structure.

**Acknowledgements:** This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant numbers [FSGF-2024-0003]).

**For citation:** Negrov, D.A., Putintsev, V.Yu. & Glotov, A.Ig. (2024). The impact of improved technology pressing on structure formation polytetrafluoroethylene. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 234-244. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2024.01.031. EDN: <https://elibrary.ru/JCAATM>.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в областях машиностроительного и нефтехимического производства увеличивается доля применения полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) для создания современных антифрикционных материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками (подшипники скольжения, подвижные вакуумные уплотнения, сальники) применяемых в узлах трения [1–3]. Применение в качестве матричного материала ПТФЭ обусловлено наиболее предпочтительным комплексом деформационно-прочностных и трибологических свойств. На сегодняшний день существует потребность в разработке новых технологических способов изготовления изделий на основе ПТФЭ, которые позволят значительно повысить физико-механические, триботехнические характеристики и качество готовой продукции.

Физической основой различных методов повышения эксплуатационных свойств полимерных материалов служит проведение структурной модификации на различных уровнях структурной организации полимера [4–5]. Важной особенностью при создании технологии прессования композиционных материалов является увеличение физико-механических и трибологических свойств, таких как прочность, пластичность и износостойкость [6].

Исследование процессов формирования структуры образцов из политетрафторэтилена, полученных способом холодного ультразвукового прессования с одновременно наложенной низкочастотной модуляцией 100 Гц, является перспективной задачей полимерного материаловедения.

В проведенных ранее исследованиях было установлено, что по сравнению с традиционным методом прессования, усовершенствованная технология ультразвукового прессования с модуляцией позволяет повысить комплекс упруго-прочностных характе-

ристический ПТФЭ: предел прочности при растяжении на 15 %, относительное удлинение на 13 %, модуль упругости на 8 % [7].

Целью данной работы является определение закономерностей влияния ультразвукового воздействия с одновременно наложенной низкочастотной модуляцией на параметры структуры и свойств ПТФЭ.

### МЕТОДЫ

Объектом исследования является промышленно выпускаемый политетрафторэтилен марки ПН-20 с плотностью 2,16 г/см<sup>3</sup>, со средним размером частиц в диапазоне от 6 до 20 мкм.

Методика проведения исследований заключалась в определении влияния на физико-механические свойства и структуру ПТФЭ технологических параметров ультразвукового прессования с одновременным наложением модуляции частотой 100 Гц.

Образцы для проведения исследований изготовлены по технологии холодного прессования на установке, работающей с выходной частотой 17 кГц, которая состоит:

- из гидравлического пресса ГМС-50;
- из ультразвукового генератора УЗГ-6М;
- из магнитострикционного преобразователя ПМС-15А-18.

Предварительно была проведена сушка порошка ПТФЭ в вакуумном сушильном шкафу СНВС-25/3.5 и дальнейшее размельчение в лабораторной мельнице ДМ-6.

Для изучения влияния внешнего энергетического воздействия с низкочастотной модуляцией на структуру политетрафторэтилена были изготовлены образцы по двум технологическим режимам:

Первый режим заключался в прессовании с применением только ультразвуковых колебаний с частотой 17 кГц (УЗ). При втором режиме применялись ультразвуковые колебания 17 кГц с введением одновременно наложенной низкочастотной модуляции 100 Гц (УЗ+100). Давление прессования составляло от

70 до 90 МПа, время прессования – 1 минута.

После проведения прессования была проведена термическая обработка полученных образцов в программируемой печи СНОЛ 7/10. График режима спекания образцов ПТФЭ представлен на рисунке 1.

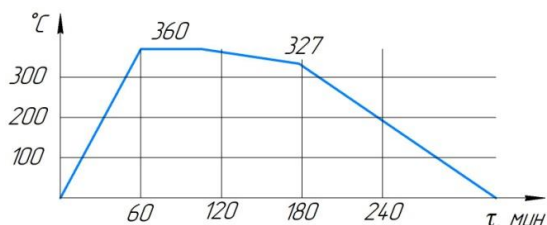


Рисунок 1 – Режим термической обработки образцов  
Figure 1 – The mode of heat treatment of samples

Физико-механические свойства (предел прочности и относительное удлинение на разрыв) материалов определялись согласно методике по ГОСТ 11262-80 на машине для испытаний Zwick Roell BT2 (Германия). Модуль упругости определялся по стандартной методике в соответствии с ГОСТ 25.601-80.

Испытания для определения показателей триботехнических характеристик (интенсивность изнашивания, коэффициент трения) полученных образцов проводились на машине трения УМТ-2168. Диаметр образцов для испытаний составил  $10,0 \pm 0,1$  мм, длина –  $15 \pm 0,1$  мм, в качестве контртела выступал стальной закаленный диск с твердостью HRC не менее 45, шероховатостью Ra не менее 0,32 мкм. При проведении испытаний к образцам прикладывалась нормальная нагрузка, равная 471 Н, линейная скорость скольжения составляла 2.7 км/ч, время испытания – 1 час. Перед испытаниями была проведена технологическая приработка образцов в течение 10 минут при заданных параметрах. Оценку скорости изнашивания образцов проводили по потере массы в единицу времени.

Исследования надмолекулярной структуры поверхностного слоя образцов выполнены на растровом электронном микроскопе JCM-5700 фирмы JEOL (Япония).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании проведенных экспериментальных исследований установлено, что у образцов, спрессованных при давлении 80 МПа с ультразвуковым воздействием и низкочастотной модуляцией 100 Гц, достигается максимальное значение предела прочности в 32 МПа (рис. 2, б), что на 9 % больше, чем у образцов, спрессованных по технологии УЗ (рис. 2, а). Дальнейшее увеличение давления прессования до 90 МПа приводит к снижению предела прочности ПТФЭ.

Максимальный показатель относительного удлинения достигается при прессовании

с применением технологического режима УЗ+100 (давление 80 МПа) и составляет 503 %, как показано на рисунке (рис. 3, б).

При режиме УЗ (рис. 3, а) значение относительного удлинения при идентичных условиях испытания меньше на 9 %. Дальнейшее увеличение давления прессования не приводит к изменению относительного удлинения.

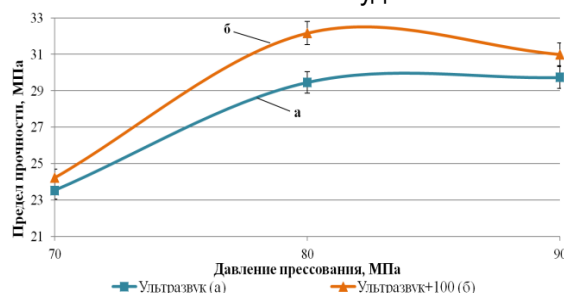


Рисунок 2 – Зависимость предела прочности от давления прессования

Figure 2 – Dependence of the tensile strength on the pressing pressure

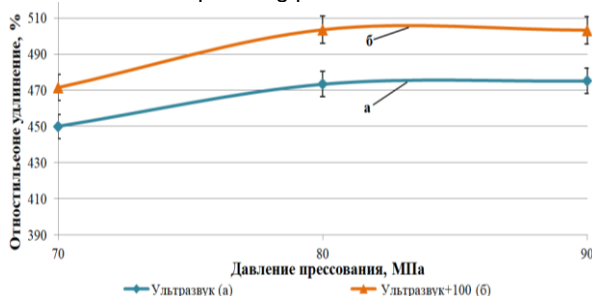


Рисунок 3 – Зависимость относительного удлинения от давления прессования

Figure 3 – Dependence of relative pressure on pressing pressure

Сравнение значения модуля упругости образцов показало, что наибольшее значение в 422 МПа достигается также на технологическом режиме УЗ+100 (рис.4, б) – данные показатели на 6 % больше, чем у образцов, изготовленных по технологии с применением ультразвукового прессования (рис.4, а).

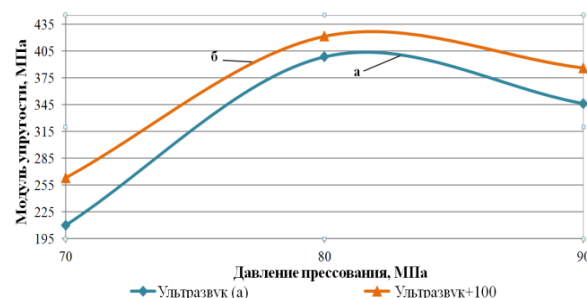


Рисунок 4 – Зависимость модуля упругости от давления прессования

Figure 4 – Dependence of the modulus of elasticity on the pressing pressure

## ВЛИЯНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕССОВАНИЯ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Анализ триботехнических свойств образцов показал, что наименьшие показатели интенсивности изнашивания в 0,394 г/ч достигаются при применении технологического режима УЗ+100 и давлении прессования 80 МПа. Данный показатель на 22 % меньше, чем у образцов, полученных по технологии УЗ с идентичным давлением прессования (рис. 5).



Рисунок 5 – Зависимость интенсивности массового изнашивания от давления прессования

Figure 5 – Dependence of the intensity of mass wear on the pressing pressure

Наблюдается также снижение значений коэффициента трения до 0,266, что на 24 % меньше по сравнению с режимом УЗ (рис. 6).

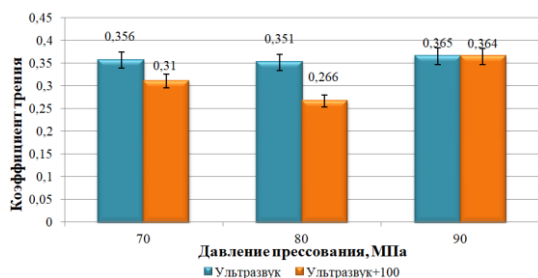


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента трения от давления прессования

Figure 6 – Dependence of the friction coefficient on the pressing pressure

Повышение антифрикционных свойств ПТФЭ, полученных усовершенствованным технологическим способом, возможно, связано с более равномерным распределением частиц порошка в объеме пресс-формы, разрушением уплотнений, уменьшением пористости материала, изменением надмолекулярной структуры за счет наложения акустических волн, находящихся в различном частотном диапазоне.

Методом атомно-силовой микроскопии установлено, что наложение ультразвуковых колебаний с низкочастотной модуляцией 100 Гц (рис. 8) по сравнению технологическим режимом УЗ (рис. 7) приводит к изменению рельефа поверхности трения, уменьшению микронеровностей примерно в 2 раза.

При большем увеличении площади сканируемой поверхности образцов методом

АСМ после проведения трения для режимов УЗ (рис. 9) и УЗ+100 (рис. 10) наблюдается равномерный «губчатый» рельеф с присутствием небольших кратеров без ярко выраженных пиков высотой до 0,22 мкм.

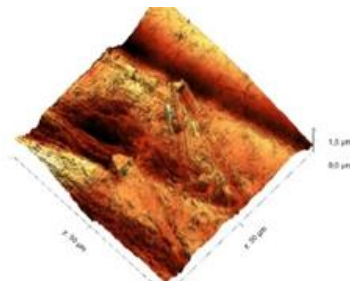


Рисунок 7 – Изображение поверхности трения образца ПТФЭ режим УЗ

Figure 7 – Image of the friction surface of the PTFE sample ultrasonic mode

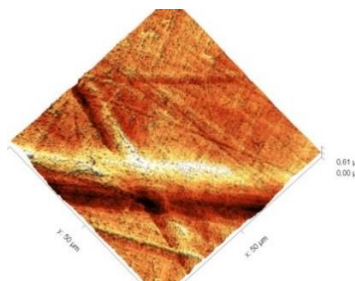


Рисунок 8 – Изображение поверхности трения образца ПТФЭ режим УЗ+100

Figure 8 – Image of the friction surface of the PTFE sample UZ+100 mode

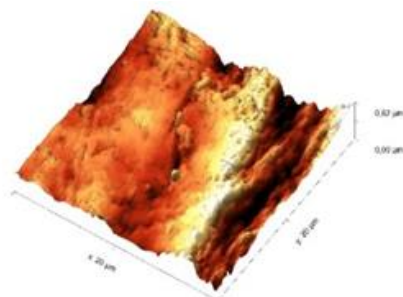


Рисунок 9 – Изображение поверхности трения образца ПТФЭ режим УЗ

Figure 9 – Image of the friction surface of the PTFE image ultrasonic mode

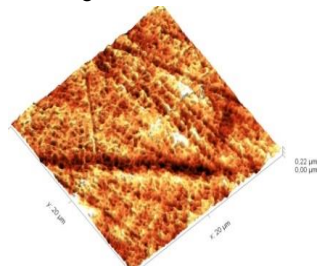


Рисунок 10 – Изображение поверхности трения образца ПТФЭ режим УЗ+100

Figure 10 – Image of the friction surface of the PTFE sample UZ+100 mode

Методом электронной микроскопии обнаружены существенные различия в морфологии ПТФЭ при анализе структуры образцов полученных с применением режима УЗ и УЗ+100.

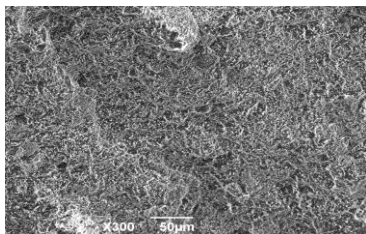


Рисунок 11 – Микрофотография образца ПТФЭ режим УЗ

Figure 11 – Micrography of the PTFE sample ultrasound mode

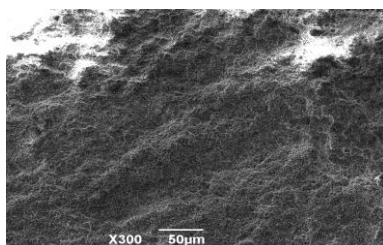


Рисунок 12 – Микрофотография образца ПТФЭ режим УЗ+100

Figure 12 – Micrography of the PTFE sample UZ+100 mode

В первом случае (рис. 11) материал имеет неоднородное строение, наблюдаются явно выраженные раковины и пустоты. После введения низкочастотной модуляции (рис. 12) структура политетрафторэтилена становится более равномерной, упорядоченной, однородной, увеличивается толщина волокон, не наблюдаются плотные скопления протяженных образований – ламелей.

### ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований установлено влияние ультразвукового воздействия частотой 17 кГц с одновременно наложенной низкочастотной амплитудной модуляцией 100 Гц на структуру и свойства ПТФЭ.

Применение данного режима позволяет повысить механические свойства ПТФЭ: предел прочности при растяжении на 9 %, относительное удлинение на 9 %, модуль упругости на 6 %, а также снизить интенсивность массового изнашивания на 22 % и коэффициента трения на 24 %.

Использование низкочастотной модуля-

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 15 июня 2023; одобрена после рецензирования 29 февраля 2024; принята к публикации 05 марта 2024.*

*The article was received by the editorial board on 15 June 2023; approved after editing on 29 Feb 2024; accepted for publication on 05 Mar 2024.*

ции приводит к снижению шероховатости рельефа поверхности трения.

Позволяет получить более равномерную, упорядоченную и однородную структуру ПТФЭ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаменко Н.А., Большасов Е.Н., Бузник В.В. Фторполимерные материалы, Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук. Томск : НТЛ, 2017, 596 с. ISBN 978-5-89503-596-2.
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. Машков Ю.К., Кропотин О.В., Чемисенко О.В. Разработка и исследование полимерного нанокомпозита для металлополимерных узлов трения // Омский научный вестник. 2014. № 3 (133), С. 64–66.
4. Negrov D.A., Putintsev V.Yu. Using advanced pressing technology for the wear resistance of polytetrafluoroethylene. *AIP Conference Proceedings*, 26 July 2023; 2784 (1): 040013. <https://doi.org/10.1063/5.0150062>.
5. Аюрова О.Ж. [и др.]. Сравнительный анализ химических и физических методов модификации поверхности политетрафторэтилена // Инновационные технологии в науке и образовании. 2015. С. 39–42. DOI: 10.18101/978-5-9793-0803-6-39-42.
6. Машков Ю.К., Рубан А.С., Рогачев Е.А., Чемисенко О.В. (2017). Изменение структуры и износостойкости птфэ-нанокомпозитов при различных методах структурной модификации. *Динамика систем, механизмов и машин*, 5 (2), 188–193.
7. 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.

### Информация об авторах

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

*В. Ю. Путинцев – к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Омского государственного технического университета.*

*А. И. Глотов – ассистент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Омского государственного технического университета.*

### 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 - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Omsk State Technical University.*

*A.Ig.Glotov - Assistant of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Omsk State Technical University.*