

Улучшение механических и триботехнических характеристик синтезируемого полимерного композиционного материала

Д.А. Негров, В.Ю. Путинцев, П.В. Плохотнюк, Д.А. Вебер, А.В. Плохотнюк  
*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

*Аннотация:*

*Одной из проблем современного полимерного материаловедения является повышенный износ деталей узлов трения изготовленных из полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ). Для исследования рациональных механических свойств и триботехнических характеристик политетрафторэтилен модифицирован гексагональным нитридом бора разной концентрации. Одним из новых технологических режимов ультразвукового прессования ПКМ на основе ПТФЭ является наложение дополнительной низкочастотной модуляции. Установлено, что режим ультразвукового прессования с одновременно наложенной низкочастотной модуляцией 100 Гц композиционного материала, модифицированного гексагональным нитридом бора 5 масс. % позволяет повысить механические свойства: предел прочности и относительное удлинение на 7 %, модуль упругости на 15 %. Снизить трибологические свойства: интенсивность массового изнашивания на 25 %, коэффициент трения на 4 %.*

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

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

Выбор политетрафторэтилена обоснован высокими антифрикционными свойствами и способностью работать в узлах трения в условиях сухой смазки. Уникальные триботехнические характеристики ПТФЭ заключаются в низком коэффициенте трения (0,04-0,08) при скорости скольжения менее 0,01 м/с. При увеличении скорости скольжения коэффициент трения ПТФЭ возрастает и составляет более 0,3 [3]. Наиболее распространенным методом улучшения механических свойств и триботехнических характеристик является введение в полимерную матрицу наполнителей-модификаторов различного типа (дисперсных, волокнистых, ультрадисперсных). В качестве наполнителя применялся нитрид бора, который существенно влияет на прочностные и пластические свойства полимерных композиционных материалов, понижает

коэффициент трения и интенсивность изнашивания ПКМ.

Образцы изготавливались холодным прессованием. Для повышения качества прессования, получили применение способы уплотнения порошков с наложением внешнего ультразвукового воздействия. Под действием акустической вибрации силы трения и сцепления частиц уменьшаются, существенно облегчается возникновение и развитие пластической деформации частиц порошка. [2-4]. При этом повышается равномерность укладки компонентов полимера. Предлагаемая технология прессования ПКМ с ультразвуковым воздействием и одновременно наложенной низкочастотной амплитудной модуляцией, обеспечит усиление степени взаимодействия наполнителей с полимером, новые эффекты объемного воздействия разно частотных акустических волн, равномерность укладки частиц полимера, уменьшит поры, разрушит арочные образования в процессе формирования ПКМ [5-6]. Целью данной работы является исследование влияния ультразвукового воздействия с одновременно наложенной низкочастотной модуляцией на механические свойства и триботехнические характеристики полимерного композиционного материала на основе политетрафторэтилена, модифицированного гексагональным нитридом бора.

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

Методика исследования заключалась в сравнении двух технологических режимов ультразвукового прессования на механические свойства и триботехнические характеристики полимерного композиционного материала. Предварительно проведено механическое размельчение и смешивание порошка в лабораторной мельнице с частотой вращения ножей не менее  $2800 \text{ мин}^{-1}$ . Образцы изготовлены по двум технологическим режимам. Первый режим – заключался в воздействии ультразвуковых колебаний 17 кГц без низкочастотной модуляции (УЗ). Второй режим – ультразвуковые колебания 17 кГц с одновременно наложенной низкочастотной модуляцией 100 Гц (УЗ+100). Время прессования составляло 60 секунд. Образцы для исследований изготавливали на установке, состоящей из гидравлического пресса ГМС-50, модернизированного ультразвукового генератора УЗГ-6М, работающем в частотном диапазоне 17-23 кГц, магнитострикционного преобразователя ПМС-15А-18.

Термическая обработка образцов проводилась в программируемой печи СНОЛ 7/10. Режим спекания образцов ПТФЭ заключался в плавном нагреве до  $360 \text{ }^\circ\text{C}$  со скоростью  $2 \text{ }^\circ\text{C/мин}$ , выдержке заготовки полимерного композита при температуре  $360 \text{ }^\circ\text{C}$  из расчета 9 мин на 1 мм толщины образца, регулируемом охлаждении со скоростью  $0,5 \text{ }^\circ\text{C/мин}$  до  $327 \text{ }^\circ\text{C}$  и последующим охлаждением вместе с печью до комнатной температуры.

Для определения механических свойств согласно ГОСТ 11262-80 использовалась машина для испытаний Zwick Roell ВТ2. Модуль упругости определялся по стандартной методике ГОСТ 25.601-80.

Определение триботехнических характеристик проводилось на машине трения УМТ-2168. Диаметр образцов 10 мм, длина 15 мм, контртело – стальной диск из стали марки 45 с твёрдостью 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. Технологическую приработку ПКМ проводили в течении 10 минут при нагрузке 471 Н и скорости скольжения 0,75 м/с.

В результате проведенных исследований установлено, что у образцов, отпрессованных с ультразвуковым воздействием и одновременно наложенной низкочастотной модуляцией 100 Гц (рис 1. а) при содержании 5 масс. % нитрида бора достигается максимальное значение предела прочности 28 МПа, что на 7 % больше, чем у образцов полученных с ультразвуковым воздействием (рис 1. б).

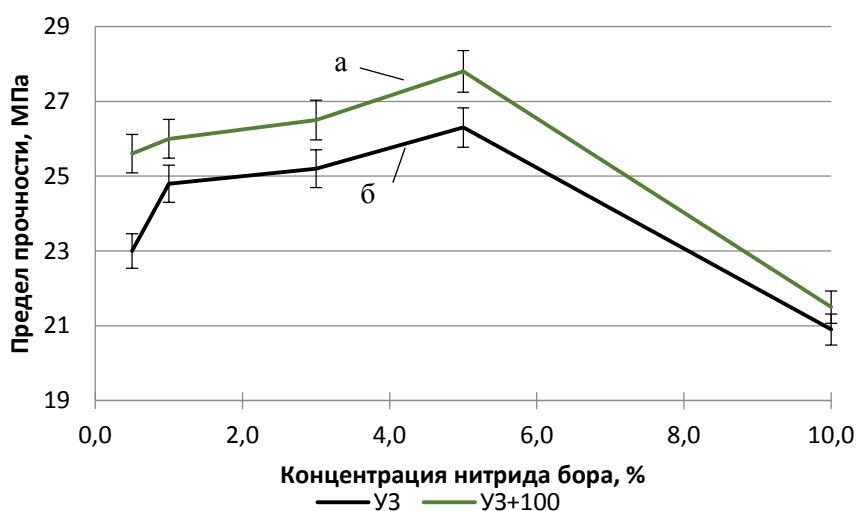


Рисунок 1 – Зависимость предела прочности от концентрации нитрида бора

Максимальное значение относительного удлинения достигается на режиме УЗ+100 (рис 1. а) при концентрации нитрида бора 3 масс. % и составляет 520 %, дальнейшее увеличение содержания до 5 масс. % приводит к плавному уменьшению относительного удлинения (рис. 2), до 10 масс. % к резкому уменьшению до 360 %.

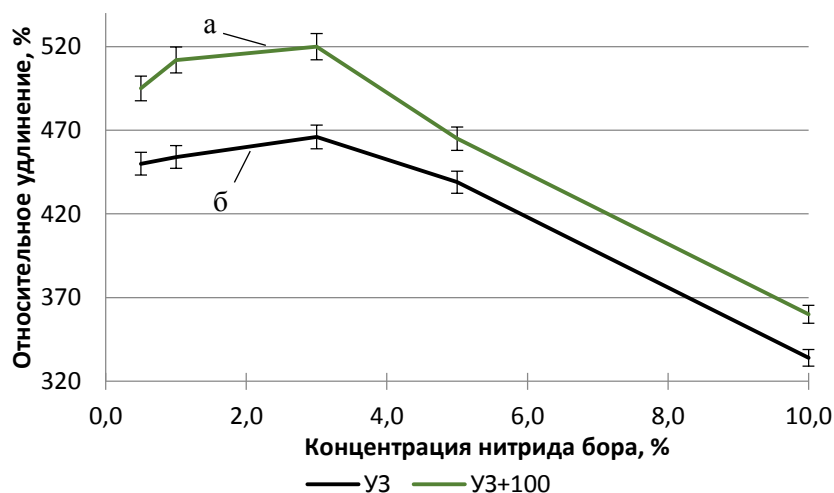


Рисунок 2 – Зависимость относительного удлинения от концентрации нитрида бора

Значения модуля упругости всех образцов представлены на рисунке 3. Максимальное значение модуля упругости достигается на режиме УЗ+100 и составляет 504 МПа — это на 15 % больше, чем у образцов, полученных ультразвуковым прессованием.

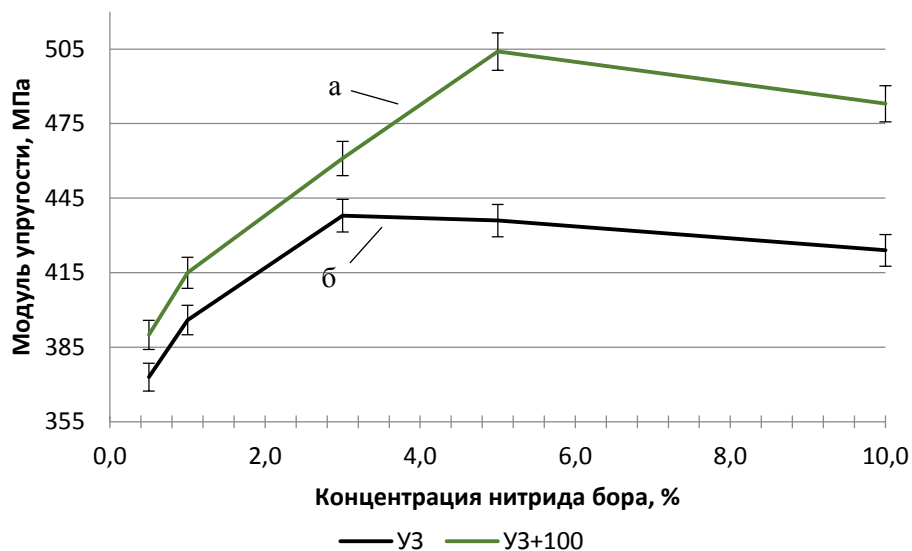


Рисунок 3 – Зависимость модуля упругости от концентрации нитрида бора

Анализ триботехнических характеристик материала в условиях сухого трения показал, что минимальная интенсивность массового изнашивания достигается на режиме прессования УЗ+100 при концентрации наполнителя 5 масс. % и составляет 0,151 г/ч, что на 25 % меньше, чем у образцов, полученных с помощью технологического режима УЗ (рис. 4). Значение коэффициента трения при этом составляет 0,24, что на 4% меньше, чем у образцов, синтезированных ультразвуковым прессованием (рис. 5).

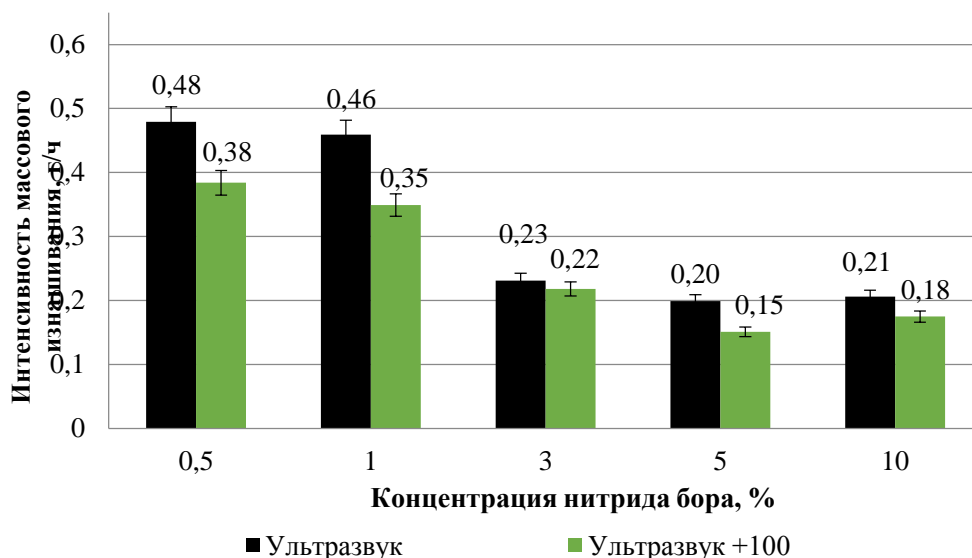


Рисунок 4 – Зависимость интенсивности массового изнашивания от концентрации нитрида бора

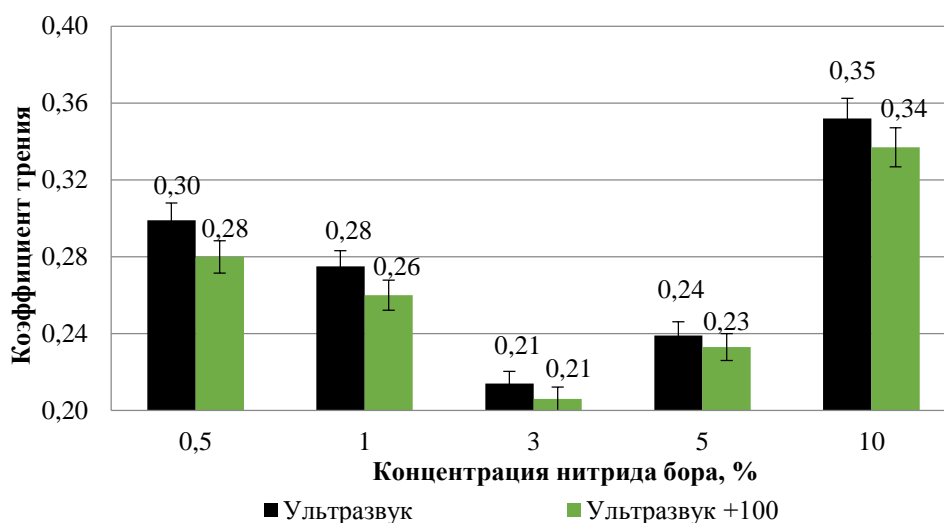


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента трения от концентрации нитрида бора

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

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

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

Режим УЗ+100 позволяет повысить механические свойства модифицированного ПТФЭ с наполнителем нитрид бора 5 масс. %: предел прочности и относительное удлинение на 7 %, модуль упругости на 15 %.

На основании проведенных исследований триботехнических характеристик ПКМ на основе ПТФЭ модифицированных гексагональным нитридом бора 5 масс. % наблюдается снижение интенсивности массового изнашивания на 25 %, коэффициента трения на 4 %.

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

#### Библиографический список

1. Негров, Д. А. Влияние низкочастотной модуляции на механические свойства и триботехнические характеристики полимерных композиционных материалов / Д. А. Негров, В. Ю. Путинцев // Ползуновский вестник. – 2021. – № 4. – С. 140-145
2. Еремин Е.Н., Негров Д.А., Совершенствование технологии изготовления подшипников скольжения из композиционных материалов на основе политетрафторэтилена // Технология машиностроения. 2010. №1 С.30-32
3. Негров Д.А., Еремин Е.Н., Мирошниченко О.М. Разработка ультразвукового инструмента для изготовления изделий из полимерных композиционных материалов // Технология машиностроения. 2012. №5. С. 44-47
4. Негров Д.А., Еремеев Е.Н., Путинцев В.Ю. Исследование влияния энергии ультразвуковых колебаний на структуру композиционного материала // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2014. №7(208). С. 3-5.
5. Негров, Д. А. Усовершенствование технологии прессования изделий из политетрафторэтилена / Д. А. Негров, В. Ю. Путинцев // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2021. – Т. 14. – № 5. – С. 564-571
6. Негров Д.А., Еремин Е.Н. Влияние параметров ультразвукового прессования на механические и триботехнические свойства структурномодифицированного политетрафторэтилена // Омский научный вестник. 2009. №2 (80). С. 58-60