DOI: https://doi.org/10.17816/vto635226



587

Влияние сверхнизкого содержания нанопластин графита на трибологические свойства композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена

А.С. Заболотнов¹, Р.И. Челмодеев², Ю.С. Лукина², С.С. Гостев¹, Д.В. Смоленцев², Н.С. Гаврюшенко²

¹ Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова, Москва, Россия;

² Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Совершенствование технологии изготовления сверхвысокомолекулярного полиэтилена остаётся одной из приоритетных задач медицинской техники, ведь вкладыш эндопротеза относится к одним из самых слабых элементов искусственных суставов, являясь наиболее частой причиной их повреждения или разрушения. Армирование наполнителями сверхвысокомолекулярного полиэтилена позволяет продлить срок службы изделий из него за счёт снижения скорости износа и коэффициента трения для различных пар трения.

Цель. Исследовать влияние сверхнизкого содержания нанопластин графита в концентрациях 0,006–0,307 мас.% на комплекс трибологических характеристик и износостойкость композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена.

Материалы и методы. Синтезированный по различным технологиям сверхвысокомолекулярный полиэтилен исследовали на трибологические свойства на трибометре Nanovea и на износостойкость по ISO 15527 в сравнении с коммерческими марками сверхвысокомолекулярного полиэтилена компании Ticona.

Результаты. Определён диапазон концентраций нанопластин графита, при которых коэффициент трения достигает наименьших значений. Установлено, что коэффициент трения сверхвысокомолекулярного полиэтилена без наполнителя соответствует коммерческим продуктам GUR 1020 и GUR 1050 торговой марки Chirulen, а композиты на его основе обладают меньшим коэффициентом трения. Определена оптимальная концентрация наполнителя по результатам трибологических испытаний и испытаний на износостойкость

Заключение. Введение нанопластин графита приводит к увеличению стойкости к износу при воздействии водно-песчаной суспензии.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен; нанопластины графита; трибологические свойства; композиты; износ.

Как цитировать:

Заболотнов А.С., Челмодеев Р.И., Лукина Ю.С., Гостев С.С., Смоленцев Д.В., Гаврюшенко Н.С. Влияние сверхнизкого содержания нанопластин графита на трибологические свойства композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2024. Т. 31, № 4. С. 587–598. DOI: https://doi.org/10.17816/vto635226

Рукопись получена: 16.08.2024

Рукопись одобрена: 23.09.2024

Опубликована online: 05.11.2024



Effect of ultra-low content of graphite nanoplatelets on tribological properties of composites based on ultra-high molecular weight polyethylene

Aleksandr S. Zabolotnov¹, Rostislav I. Chelmodeev², Yulia S. Lukina², Sergey S. Gostev¹, Dmitriy V. Smolentsev², Nikolay S. Gavryushenko²

¹ Semenov Federal Research Center of Chemical Physics, Moscow, Russia;

² Priorov Central Institute for Trauma and Orthopedics, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Improving ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMW PE) production techniques continues to be a top priority in medical engineering. This is due to the fact that liners are the weakest components of artificial joints, causing the majority of their damage or destruction. Filler reinforcement of UHMW PE improves the durability of UHMW PE products by decreasing the wear rate and coefficient of friction for various friction pairs.

AIM: To assess the effect of ultra-low graphite nanoplate content (0.006–0.307 mass%) on the tribological properties and wear resistance of UHMW PE-based composites.

MATERIALS AND METHODS: UHMW PE synthesized using various technologies was compared to commercial-grade UHMW PE produced by Ticona. The tribological properties were examined using the Nanovea Tribometer, and the wear resistance was assessed according to ISO 15527.

RESULTS: The study identified the range of graphite nanoplate concentrations with the lowest coefficient of friction. The coefficient of friction of UHMW PE without a filler corresponds to that of commercial-grade products GUR 1020 and GUR 1050 of the Chirulen brand, and composites made from it have a lower coefficient of friction. The optimal filler concentration was determined based on tribological and wear test findings.

CONCLUSION: Graphite nanoplates increase wear resistance when exposed to a water-sand suspension.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene; graphite nanoplates; tribological properties; composites; wear.

To cite this article:

Zabolotnov AS, Chelmodeev RI, Lukina YuS, Gostev SS, Smolentsev DV, Gavryushenko NS. Effect of ultra-low content of graphite nanoplatelets on tribological properties of composites based on ultra-high molecular weight polyethylene. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2024;31(4):587–598. DOI: https://doi.org/10.17816/vto635226

Received: 16.08.2024



588

ОБОСНОВАНИЕ

Дисфункции костей и суставов являются основной причиной социальной и трудовой нетрудоспособности людей во всём мире. Эндопротезирование суставов представляет собой дорогостоящую процедуру, зависящую от области операции, возраста и веса пациента, объёма процедуры, типа протеза и используемых компонентов, однако в большинстве случаев это единственный способ эффективно и полностью излечить инвалидность у миллионов людей во всём мире [1].

Согласно отчёту центров по контролю и профилактике заболеваний США, ожидается, что по всему миру частота переломов шейки бедра вырастет на 240% у женщин и на 310% у мужчин. Прогнозы на 2020-2040 годы по США подтверждают прогрессию числа вмешательств для тотального эндопротезирования тазобедренного сустава с 34% в 2020 году до 284% в 2040 году, а для тотального эндопротезирования коленного сустава — с 56 до 401% соответственно [2]. По данным Центра ортопедической и неврологической помощи и исследований, к 2030 году количество операций по замене коленного сустава увеличится на 673% — до 3,5 миллиона процедур в год. Количество ревизионных операций по эндопротезированию в России имеет тенденцию к увеличению. Одной из основных причин необходимости проведения реимплантационных процедур является механическое разрушение элементов искусственной биоопоры.

Несмотря на динамичное развитие области материаловедения, универсальный для имплантации всем пациентам и достаточно безотказный искусственный узел трения разработать не удалось. Постоянно проводятся исследования по внедрению современных материалов для компонентов искусственных суставов и улучшению срока службы эндопротезов с особым акцентом на узле трения [3–6]. Разрушение элементов узла трения является одной из основных причин ревизионной артропластики, которая несёт больший риск неудач и осложнений, чем первичная, и является более сложной и дорогостоящей процедурой.

При различных сочетаниях пар трения, используемых в эндопротезах, наиболее часто повреждаются элементы, изготовленные из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) [7, 8].

Согласно исследованию, проведённому Grand View Research, рыночный спрос на СВМПЭ значительно вырос с 60,9 до 204,8 килотонны в период 2015—2024 гг., что оценивается в 1,36 млрд долл. США с годовым темпом роста в 15% [9].

Несмотря на значительное развитие области улучшения свойств полимерных материалов, используемых в ортопедии, вкладыш эндопротезов из СВМПЭ по-прежнему остаётся самым слабым элементом, являясь наиболее частой причиной повреждения или разрушения искусственных суставов. Однако СВМПЭ не может быть заменён из-за его уникальных свойств, таких как превосходная износостойкость, высокая ударопрочность, низкий коэффициент трения и хорошая биосовместимость [10, 11].

Для долгосрочного клинического применения СВМПЭ трибологические характеристики и срок службы являются ключевыми аспектами [12, 13]. Вкладыши из СВМПЭ имеют ограниченный срок службы из-за осложнений, связанных с износом, окислительной деградации вследствие образования свободных радикалов при облучении гаммалучами и старения имплантата [9].

Хотя основная масса СВМПЭ инертна к телу и обладает хорошей износостойкостью, неизбежный износ, образующийся при повторяющихся движениях суставов, вызывает реакцию тканей организма. Разрыхленные микроскопические и субмикроскопические частицы СВМПЭ, образующиеся в результате трения между двумя компонентами, вызывают воспалительные реакции, которые в дальнейшем приводят к остеолизу, за которым следует ослабление имплантата. Это ослабление имплантата в сочетании с усталостью вызывает асептическое ослабление, в конечном итоге приводящее к отказу имплантата [14–16].

Один из альтернативных подходов к функционализации СВМПЭ заключается в реализации армирования, что приводит к улучшению объёмных свойств, таких как низкий коэффициент трения, низкая скорость износа, высокая прочность на разрыв, биосовместимость, стойкость к окислению и т.д. Композитные материалы на основе матрицы СВМПЭ в качестве наполнителя могут содержать гидроксиапатит [17, 18], витамин Е (а-токоферол) [19, 20], карбид кремния [21], оксид цинка [22] и др. Особый интерес представляют материалы с углеродными функциональными наполнителями различной природы: наноалмаз [23], углеродное волокно [24], углеродные нанотрубки [25, 26], графен [27, 28] в качестве армирующих материалов для улучшения механических свойств СВМПЭ и достижения длительного срока службы имплантатов.

Так, Y.-S. Zoo и соавт. [29] использовали в качестве СВМПЭ наполнителя многослойные углеродные нанотрубки, изготовленные методом термического химического осаждения из газовой фазы. Износ композита на основе СВМПЭ-углеродных нанотрубок был значительно снижен при добавлении наполнителя до 5 мас.%, однако коэффициент трения был незначительно увеличен. Повышение коэффициента трения и снижение потерь на износ были вызваны не структурными изменениями, а увеличением прочности на сдвиг более мягкого СВМПЭ. Различная морфология истёртых образцов при добавлении углеродных нанотрубок подтверждает идею о воздействии армирования на трибологическое поведение. J.F. Vega и соавт. предположили, что углеродные нанотрубки действуют как зародышеобразующие агенты для полимерных цепей, и наличие адсорбированных цепей вызывает изменения в механических свойствах полимера [30].

В исследовании А. Golchin и соавт. положительный трибологический отклик композитов СВМПЭ-наноалмаз

наблюдался при концентрации наполнителя до 1 мас.%, увеличение которой не оказывает положительного влияния на трение и износ полимерных композитов [23]. Благодаря наномасштабным размерам и полусферической морфологии наноалмаза он действует как шарики подшипника между поверхностями трибологической пары, и отсоединённые частицы износа могут катиться, что снижает трение между сопряжёнными поверхностями. Уменьшение напряжения сдвига, действующего на цепи СВМПЭ из-за уменьшенной силы трения, приводит к снижению скорости износа трибопар. Однако топографический анализ металлических сопрягающихся поверхностей показал снижение шероховатости поверхности Ra после скольжения по композитам СВМПЭ-наноалмаз.

G. Sui и соавт. [31] показали, что модуль упругости при растяжении и прочность на разрыв композитов СВМПЭ/высокопрочный полиэтилен были увеличены при включении до 1 мас.% углеродных нановолокон с тенденцией к последующему снижению. Сверхмалые концентрации графена также улучшают механические характеристики СВМПЭ [32].

Механические свойства достигают наилучших значений при оптимальной концентрации наполнителя, которая может различаться для разных механических параметров. Так, при росте коэффициента трения при введении нанопластин графена в СВМПЭ скорость износа композита снижается при увеличении концентрации наполнителя до 0,24 мас.% [28].

По литературным данным, потенциал композитов СВМПЭ-графит для трибологических применений довольно высок [33]. Добавление графита способно улучшать механические свойства матрицы СВМПЭ, увеличив микротвёрдость и модуль упругости, уменьшить скорость износа.

Цель работы — исследование трибологических свойств поверхностей скольжения оксида алюминия (Al₂O₃) по композиту СВМПЭ-нанопластины графита (СВМПЭ-НПГ) и износостойкости композитов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Синтез композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и нанопластин графита осуществляли методом полимеризационного наполнения (полимеризации *in situ*). Для получения нанопластин графита использовали окислённый сильными кислотами графит марки EG350 (WellChem(Group) Industry Co., Ltd, Китай). Его подвергали термическому расширению путём быстрого нагрева до 700 °С. Образующиеся в результате червеобразные пористые частицы терморасширенного графита (ТРГ), состоящие из слабосвязанных нанослоёв графита, подвергали ультразвуковой обработке в водноспиртовой среде в течение 60 минут, в результате чего ТРГ распадался на отдельные нанослои. Продукт фильтровали и сушили в вакууме при 60 °С. Полученные нанопластины графита имели толщину ~20 нм и продольные размеры 1–10 мкм. Удельная поверхность составляла 25,6 м²/г. Методика синтеза композитов и получение самой НПГ описаны в работе P.N. Brevnov и соавт. [34].

Для исследования трибологических и теплофизических свойств композитов на основе СВМПЭ была получена серия образцов с содержанием нанопластин графита от 0,0027 до 0,136 об.% (0,006–0,307 мас.%).

Определённая молекулярная масса образцов находится в диапазоне 3,8–4,3×10⁶ г/моль.

Образцы пластин для исследований получали методом горячего прессования порошков синтезированных композитов в пресс-форме закрытого типа на прессе марки Carver. Образцы прессовали при температуре (180±3) °С в течение 20 мин. Давление прессования составляло 10 МПа/см² и сохранялось при охлаждении образцов до температуры 20 °С. Скорость охлаждения составляла ~10 °С/мин.

Условия проведения

Исследования проводились в нормальных условиях. Исследование трибологических свойств поверхностей скольжения оксида алюминия (Al₂O₃) по композиту СВМПЭ-НПГ выполнялось с использованием возвратнопоступательного трибометра Nanovea по типу «шарик на диске» (рис. 1). Параметры испытаний для измерения коэффициента трения указаны в табл. 1. Все исследуемые образцы сравнивались с коммерческими марками СВМПЭ компании Ticona GUR 1020 и GUR 1050, уже широко использующимися в медицине, в частности в области эндопротезирования.

Полученные с трибометра данные (изменение коэффициента трения µ от длины пути износа) обрабатывались следующим образом: строилась огибающая коэффициента трения, затем полученная кривая сглаживалась с применением смежного усреднения. Характерный вид получаемых данных (концентрация нанопластин графита — 0,093 мас.%) и их последующая математическая обработка приведены на рис. 2.

Износостойкость немодифицированного СВМПЭ и композиционных материалов СВМПЭ-НПГ при высокоскоростном воздействии водно-песчаной суспензии определяли согласно ISO 15527. Образцы для испытания размером 78×22×6 мм вырезали из спрессованных пластин толщиной 6 мм. В качестве абразивного материала использовался молотый кварцевый песок с размером гранул 0,8–2,0 мм. Массовое соотношение абразива и воды составляло 3:2. Скорость вращения образца в водно-песчаной суспензии — 1200 об/мин, время испытания — 3 часа.

Статистический анализ

В рамках проведённого исследования медицинские вмешательства не выполнялись. Статистический анализ не проводился.



Рис. 1. Схема трибологических испытаний. **Fig. 1.** Tribological testing scheme.

Таблица 1. Параметры испытания

 Table 1. Test parameters

Параметр	Характеристика			
Движение образца	Возвратно-поступательное			
Скорость перемещения образца, мм/мин	1980			
Время испытания, ч	24			
Длина трека износа (один проход), мм	35			
Форма индентора	Сферическая			
Диаметр индентора, мм	3			
Материал индентора	Al ₂ O ₃			
Нагружающая сила, Н	15			



Рис. 2. Изменение коэффициента трения от длины пути износа для образца с содержанием нанопластин графита с *N*=0,093 мас.%. **Fig. 2.** Change in the friction coefficient depending on the wear path length for a sample containing graphite nanoplates with *N*=0.093 wt.%.

Габлица 2. Значения среднего коэффициента трения для образцов с содержанием нанопластин графита
Table 2. Values of the average coefficient of friction for samples containing graphite nanoplatelets

Table 2. Values of the average coefficient of metion for samples containing graphice handplateters						
<i>N</i> , мас.% НПГ	0,006	0,034	0,058	0,093	0,202	0,307
μ _{cp}	0,124	0,129	0, 129	0,132	0,171	0,152
$\mu_{cp.макc}$	0,157	0,176	0,169	0,168	0,217	0, 192

Примечание. НПГ — нанопластины графита, μ_{cp} — средний коэффициент трения, $\mu_{cp.макc}$ — средний максимальный коэффициент трения. Note. НПГ — graphite nanoplates, μ_{cp} — average friction coefficient, $\mu_{cp.макc}$ — average maximum friction coefficient.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изменение коэффициента трения от длины пути износа для образцов с содержанием нанопластин графита от 0,006 до 0,307 мас.% показано на рис. 3. Значения среднего коэффициента трения (μ_{cp}) и среднего максимального коэффициента трения ($\mu_{cp.макс}$), полученного для сглаженной огибающей, приведены в табл. 2.

Также аналогичным трибологическим испытаниям были подвергнуты образцы СВМПЭ, синтезированного без нанонаполнителя, и различных коммерческих марок. В качестве образцов сравнения были выбраны коммерческие марки медицинского сверхвысокомолекулярного полиэтилена GUR 1020, GUR 1050, которые успешно зарекомендовали себя на рынке изделий для эндопротезирования (из него выпускаются изделия под брендом Chirulen). Результаты их испытаний приведены на рис. 4 и в табл. 3. Износостойкость образцов СВМПЭ и композиционных материалов на его основе была исследована при высокоскоростном воздействии водно-песчаной суспензии. Введение нанопластин графита в матрицу СВМПЭ позволяет существенно улучшить износостойкость материала при данном типе износа (рис. 5).

Так, снижение массы образца GUR 1020 после трёхчасового воздействия водно-песчаной суспензии составило 0,8632 грамма. Потеря массы образцов синтезированных композитов СВМПЭ-НПГ значительно ниже, и уже при содержании нанопластин графита 0,006 мас.% материал имеет существенно более высокую износостойкость, снижение массы данного материала составило 0,5804 грамма за 3 часа, что примерно на 33 % ниже, чем аналогичный показатель у марки GUR 1020. Дальнейшее увеличение содержания нанопластин графита в матрице СВМПЭ до 0,1– 0,2 мас.% приводит к росту износостойкости: изменение массы образцов составляет порядка 0,51–0,52 грамма.



Рис. 3. Зависимость коэффициента трения (сглаженные огибающие) от концентрации нанопластин графита в синтезированных СВМПЭ-композитах.

Примечание (здесь и на рис. 4, 6). СВМПЭ — сверхвысокомолекулярный полиэтилен.

Fig. 3. Dependence of the friction coefficient (smoothed envelopes) on the concentration of graphite nanoplatelets in synthesized UHMWPE composites.

Note (here and in Fig. 4, 6). CBMIT3 — ultra-high molecular weight polyethylene.



Рис. 4. Зависимость коэффициента трения (сглаженные огибающие) от длины пути износа для образцов СВМПЭ, синтезированного без нанонаполнителя, и различных коммерческих марок.

Fig. 4. Dependence of the friction coefficient (smoothed envelopes) on the wear path length for UHMWPE samples synthesized without nanofiller and various commercial grades.

Таблица 3.	. Значения с	реднего к	оэффициента	а трения д	ля образцов	сверхвысо	комолекулярного	полиэтилена
Tahla 3 Va	lues of avera	no cooffic	iont of friction	for ultra_	high molecula	ar weight no	lyathylana samnla	26

Марка СВМПЭ	GUR 1020	GUR 1050	СВМПЭ без наполнителя	
μ _{cp}	0,145	0,132	0,142	
µ _{ср.макс}	0,185	0,168	0, 174	

Примечание. СВМПЭ — сверхвысокомолекулярный полиэтилен, μ_{cp} — средний коэффициент трения, $\mu_{cp, {\rm макс}}$ — средний максимальный коэффициент трения.

Note. CBMIT3 — ultra-high molecular weight polyethylene, μ_{cp} — average coefficient of friction, $\mu_{cp,\text{MAKC}}$ — average maximum coefficient of friction.



Рис. 5. Сравнительная износостойкость синтезированных композитов СВМПЭ-НПГ с коммерческой медицинской маркой СВМПЭ GUR 1020.

Примечание. СВМПЭ — сверхвысокомолекулярный полиэтилен, НПГ — нанопластины графита.

Fig. 5. Comparative wear resistance of synthesized UHMWPE-NPG composites with commercial medical grade UHMWPE GUR 1020. *Note.* CBMΠ3 — ultra-high molecular weight polyethylene, HΠΓ — graphite nanoplates.

обсуждение

Важными параметрами для долгосрочного клинического применения СВМПЭ являются трибологические характеристики и износ. В настоящем исследовании был проведён сравнительный анализ прессованных образцов композиционных материалов СВМПЭ-НПГ с различной концентрацией армирующего наполнителя.

Сравнение полученных в ходе измерения коэффициента трения результатов позволяет утверждать, что минимальные значения средних коэффициентов трения $\mu_{cp,Makc.}$ наблюдаются в областях низких концентраций наполнителя (N <0,1 мас.%). Максимальных значений коэффициент трения достигает в области концентраций N ~0,2 мас.% (рис. 6).

Значения среднего максимального коэффициента трения образцов СВМПЭ-НПГ до концентрации 0,1 мас.% ниже аналогичных значений для коммерческих образцов СВМПЭ GUR 1020 и GUR 1050. Проведённые трибологические исследования показали, что использование 0,006 мас.% нанопластин графита как наполнителя для СВМПЭ позволяет снизить коэффициент трения для пары трения СВМПЭ-Al₂O₃ как минимум на 6% относительно марок коммерческого СВМПЭ без использования наполнителя.

Экспериментальный СВМПЭ без наполнителя обладает незначительно более высокими значениями коэффициента трения, чем композит СВМПЭ-НПГ с низкими концентрациями наполнителя, однако трибологические характеристики экспериментального ненаполненного СВМПЭ не ниже, чем характеристики GUR 1020. Износостойкость композитов СВМПЭ-НПГ превосходит износостойкость коммерческого СВМПЭ GUR 1020 при всех исследуемых концентрациях нанопластин графита, то есть наполнитель выступает в качестве армирующей добавки, не вызывая структурных изменений в матрице. Увеличение концентрации наночастиц графита в матрице СВМПЭ свыше 0,093 мас.% не оказывает положительного влияния на трение и износ полимерных композитов.

В композитах СВМПЭ-наполнитель оптимальные концентрации наполнителя, как правило, отличаются для различных механических характеристик. Полученные экспериментальные материалы обладают оптимальными износостойкостью и коэффициентом трения в узком диапазоне концентраций наполнителя, что позволило получить материал с превосходящими известные коммерческие СВМПЭ свойствами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании изучались трибологические характеристики и износ композитов СВМПЭ-НПГ при добавлении различных концентраций наночастиц графита в матрицу СВМПЭ. Одновременное снижение износа на 33% по сравнению с коммерческим СВМПЭ GUR 1020 и коэффициента трения на 9% было достигнуто при включении 0,093 мас.% наночастиц графита в матрицу СВМПЭ. Улучшенные трибологические характеристики наряду с износостойкостью указывают на потенциал композитов СВМПЭ-НПГ для использования в качестве вкладыша в паре трения.



Рис. 6. Зависимость среднего коэффициента трения от концентрации нанопластин графита в синтезированных СВМПЭ-композитах. **Fig. 6.** Dependence of the average friction coefficient on the concentration of graphite nanoplatelets in the synthesized UHMWPE composites.

дополнительно

Вклад авторов. А.С. Заболотнов — дизайн исследования, синтез композита, экспериментальное исследование, анализ данных, редактирование статьи; Р.И. Челмодеев — экспериментальное исследование, анализ данных; Ю.С. Лукина сбор и анализ литературных источников, анализ данных, подготовка и написание текста статьи; С.С. Гостев — синтез композита, экспериментальное исследование, анализ данных; Д.В. Смоленцев — сбор и анализ литературных источников, редактирование статьи; Н.С. Гаврюшенко — кураторство, дизайн исследования. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Источник финансирования. Исследование и публикация осуществлены в рамках государственного задания Минздрава России «Разработка технологии получения материала из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) для изготовления компонентов медицинских изделий» (регистрационный номер 1023022700044-3-3.4.4 от 31 мая 2024 г.).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведённым исследованием и публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFO

Autor contribution. N.S. Gavryushenko, A.S. Zabolotnov — designed the study; A.S. Zabolotnov, R.I. Chelmodeev, S.S. Gostev --- performed experiments; A.S. Zabolotnov, R.I. Chelmodeev, S.S. Gostev, Yu.S. Lukina — analyzed data; Yu.S. Lukina, D.V. Smolentsev collection and analysis of literary sources; A.S. Zabolotnov, Yu.S. Lukina, D.V. Smolentsev — wrote the manuscript with input from all authors; A.S. Zabolotnov, S.S. Gostev - provided critical samples; N.S. Gavryushenko - oversaw the project. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Funding source. The study and publication were carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Health of Russia "Development of technology for obtaining material from ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) for the manufacture of components for medical devices" (Registration № 1023022700044-3-3.4.4 dated May 31, 2024).

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Szarek A., Postawa P., Stachowiak T., et al. The Analysis of Polyethylene Hip Joint Endoprostheses Strength Parameters Changes after Use inside the Human Body // Materials (Basel). 2021. Vol. 14, Nº 22. P. 7091. doi: 10.3390/ma14227091

2. Singh J.A., Yu S., Chen L., Cleveland J.D. Rates of total joint replacement in the United States: future projections to 2020–2040 using the national inpatient sample // The Journal of rheumatology. 2019. Vol. 46, № 9. P. 1134–1140. doi: 10.3899/jrheum.170990

3. Wu J., Peng Z. Investigation of the geometries and surface topographies of UHMWPE wear particles // Tribology International. 2013. Vol. 66. P. 208–218. doi: 10.1016/j.triboint.2013.05.005

4. Pinchuk L.S., Nikolaev V.I., Tsvetkova E.A., Goldade V. A. Tribology and biophysics of artificial joints. In: Briscoe B.J., editor. Tribology and Interface Engineering — Series 50. Oxford: Elsevier, 2006. P. 1–375.

5. Niemczewska-Wójcik M., Piekoszewski W. The surface topography of a metallic femoral head and its influence on the wear mechanism of a polymeric acetabulum // Archiv Civ Mech Eng. 2017. Vol. 17, № 2. P. 307–317. doi: 10.1016/j.acme.2016.10.010

6. Miura Y., Hasegawa M., Sudo A., Pezzotti G., Puppulin L. Invivo degradation of middle-term highly cross-linked and remelted polyethylene cups: modification induced by creep, wear and oxidation // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2015. Vol. 51. P. 13–24.

7. Choudhury D., Ranuša M., Fleming R.A., et al. Mechanical wear and oxidative degradation analysis of retrieved ultra-high molecular weight polyethylene acetabular cups // Journal of the Mechanical

Behavior of Biomedical Materials. 2018. Vol. 79. P. 314–323. doi: 10.1016/j.jmbbm.2018.01.003

8. Nabrdalik M., Sobociński M. Modeling of stress and strain distribution in uhmwpe elements of knee and hip human joints // Acta Phys Pol A. 2020. Vol. 138, № 2. P. 224–227. doi: 10.12693/APhysPolA.138.224

9. Patil N.A., Njuguna J., Kandasubramanian B. UHMWPE for Biomedical Applications: Performance and Functionalization // European Polymer Journal. 2020. Vol. 125. P. 109529. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2020

10. Li S., Xu Y., Jing X., et al. Effect of carbonization temperature on mechanical properties and biocompatibility of biochar/ultra-high molecular weight polyethylene composites // Composites Part B: Engineering. 2020. Vol. 196, Nº 18. P. 108120.

11. Xu J.Z., Muratoglu O.K., Oral E. Improved oxidation and wear resistance of ultrahigh molecular weight polyethylene using cross-linked powder reinforcement // J Biomed Mater Res B. 2019. Vol. 107, N^o 3. P. 716–723. doi: 10.1002/jbm.b.34165

12. Ruggiero A., Gómez E., Merola M. Experimental comparison on tribological pairs UHMWPE/TIAL6V4 alloy, UHMWPE/AISI316L austenitic stainless and UHMWPE/AL203 ceramic, under dry and lubricated conditions // Tribology International. 2016. Vol. 96. P. 349–360.

13. Hirakawa K., Bauer T.W., Stulberg B.N., Wilde A.H., Secic M. Characterization and comparison of wear debris from failed total hip implants of different types // J BJS. 1996. Vol. 78, N^o 8. P. 1235–1243. doi: 10.2106/00004623-199608000-00014

14. Massin P., Achour S. Wear products of total hip arthroplasty: The case of polyethylene // Morphologie. 2017. Vol. 101, № 17. P. 1–8. doi: 10.1016/j.morpho.2016.06.001

15. Zeman J., Ranuša M., Vrbka M., et al. UHMWPE acetabular cup creep deformation during the run-in phase of THA's life cycle // Journal of the mechanical behavior of biomedical materials. 2018. Vol. 87. P. 30–39. doi: 10.1016/j.jmbbm.2018.07.015

16. Affatato S., Freccero N., Taddei P. The biomaterials challenge: A comparison of polyethylene wear using a hip joint simulator // J Mech Behav Biomed Mater. 2016. Vol. 53. P. 40–48. doi: 10.1016/j.jmbbm.2015.08.001

17. Verma N., Zafar S., Pathak H. Investigations on thermal damage and surface roughness of laser beam machined nano-hydroxyapatite UHMWPE composites // Manufacturing Letters. 2020. Vol. 25. P. 81–87.

18. Senra M.R., Marques M.F.V., Souza D.H.S. Ultra-high molecular weight polyethylene bioactive composites with carbonated hydroxyapatite // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2020. Vol. 110. P. 103938. doi: 10.1016/j.jmbbm.2020.103938

19. Baena J.C., Wu J., Peng Z. Wear performance of UHMWPE and reinforced UHMWPE composites in arthroplasty applications: a review // Lubricants. 2015. Vol. 3, N^o 2. P. 413–436. doi: 10.3390/LUBRICANTS3020413

20. Saravanan P., Melk L., Emami N. Mechanical and thermal properties of vitamin E-doped UHMWPE reinforced with hydroxyapatite // Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces. 2021. Vol. 15, № 3. P. 193–200. doi: 10.1080/17515831.2020.1830252

21. Aliyu I.K., Azam M.U., Lawal D.U., Samad M.A. Optimization of SiC Concentration and Process Parameters for a Wear-Resistant UHMWPE Nancocomposite // Arabian Journal for Science and Engineering. 2020. Vol. 45. P. 849–860. doi: 10.1007/s13369-019-04164-3

22. Chang B.P., Akil H.M., Nasir R.M., Nurdijati S. Mechanical and Antibacterial Properties of Treated and Untreated Zinc Oxide filled UHMWPE Composites // J Thermoplast Compos Mater. 2011. Vol. 24, № 5. P. 653–667. doi: 10.1177/0892705711399848

23. Golchin A., Villain A., Emami N. Tribological behaviour of nanodiamond reinforced UHMWPE in water-lubricated contacts // Tribol Int. 2017. Vol. 110. P. 195–200. doi: 10.1016/j.triboint.2017.01.016

24. Wood W., Li B., Zhong W.-H. Influence of phase morphology on the sliding wear of polyethylene blends filled with carbon nanofibers // Polym Eng Sci. 2010. Vol. 50. P. 613–623. doi: 10.1002/pen.21549, 50:613-623

REFERENCES

1. Szarek A, Postawa P, Stachowiak T, et al. The Analysis of Polyethylene Hip Joint Endoprostheses Strength Parameters Changes after Use inside the Human Body. *Materials (Basel)*. 2021;14(22):7091. doi: 10.3390/ma14227091

2. Singh JA, Yu S, Chen L, Cleveland JD. Rates of total joint replacement in the United States: future projections to 2020–2040 using the national inpatient sample. *The Journal of rheumatology*. 2019;46(9):1134–1140. doi: 10.3899/jrheum.170990

25. Ruan S.L., Gao P., Yang X.G., Yu T.X. Toughening high performance ultrahigh molecular weight polyethylene using multiwalled carbon nanotubes // Polymer. 2003. Vol. 44, № 19. P. 5643–5654. doi: 10.1016/s0032-3861(03)00628-1

26. Xue Y., Wu W., Jacobs O., Schädel B. Tribological behaviour of UHMWPE/HDPE blends reinforced with multi-wall carbon nanotubes // Polym Test. 2006. Vol. 25. P. 221–229. doi: 10.1016/j.polymertesting.2005.10.005

27. Dayyoub T., Maksimkin A.V., Kaloshkin S., et al. The structure and mechanical properties of the UHMWPE films modified by the mixture of graphene nanoplates with polyaniline // Polymers. 2018. Vol. 11, № 1. P. 23. doi: 10.3390/polym11010023

28. Aliyu I.K., Mohammed A.S., Al-Qutub A. Tribological performance of ultra high molecular weight polyethylene nanocomposites reinforced with graphene nanoplatelets // Polym Compos. 2019. Vol. 40. P. E1301–E1311.

29. Zoo Y.-S., An J.-W., Lim D.-P., Lim, D.-S. Effect of Carbon Nanotube Addition on Tribological Behavior of UHMWPE // Tribology Letters. 2004. Vol. 16, № 4. P. 305–309. doi: 10.1023/b:tril.0000015206.21688.87
30. Vega J.F., Martínez-Salazar J., Trujillo M., et al. Rheology. Processing, Tensile Properties, and Crystallization of Polyethylene/ Carbon Nanotube Nanocomposites // Macromolecules. 2009. Vol. 42, № 13. P. 4719–4727. doi: 10.1021/ma900645f

31. Sui G., Zhong W.H., Ren X., Wang X.Q., Yang X.P. Structure, mechanical properties and friction behavior of UHMWPE/HDPE/ carbon nanofibers // Materials Chemistry and Physics. 2009. Vol. 115, № 1. P. 404–412. doi: 10.1016/j.matchemphys.2008.12.016 **32.** Puértolas J.A., Kurtz S.M. Evaluation of carbon nanotubes and graphene as reinforcements for UHMWPE-based composites in arthroplastic applications: A review // Journal of the mechanical behavior of biomedical materials. 2014. Vol. 39. P. 129–145. doi: 10.1016/j.jmbbm.2014.06.013

33. Somberg J., Gonçalves G., Sánchez M.S., Emami N. Chemically expanded graphite-based ultra-high molecular weight polyethylene nanocomposites with enhanced mechanical properties // Materials & Design. 2022. Vol. 224. P. 111304. doi: 10.1016/j.matdes.2022.111304 **34.** Brevnov P.N., Kirsankina G.R., Zabolotnov A.S., et al. Synthesis and properties of nanocomposite materials based on ultra-high-molecular-weight polyethylene and graphite nanoplates // J Polym Sci. 2016. Vol. 58, № 1. P. 38–49. doi: 10.1134/S1811238216010021 **35.** Zabolotnov A.S., Gostev S.S., Gudkov M.V., Novokshonova L.A., Chelmodeev R.I. The influence of ultralow content of graphene on wear-resistant properties of composites based on ultra-high molecular weight polyethylene // Polym Sci Series A. 2023. Vol. 65, № 3. P. 296–301.

3. Wu J, Peng Z. Investigation of the geometries and surface topographies of UHMWPE wear particles. *Tribology International.* 2013;66:208–218. doi: 10.1016/j.triboint.2013.05.005

4. Pinchuk LS, Nikolaev VI, Tsvetkova EA, Goldade VA. Tribology and biophysics of artificial joints. In: Briscoe BJ, editor. *Tribology and Interface Engineering — Series 50*. Oxford: Elsevier; 2006. P. 1–375.
5. Niemczewska-Wójcik M, Piekoszewski W. The surface topography of a metallic femoral head and its influence on the

597

wear mechanism of a polymeric acetabulum. *Archiv Civ Mech Eng.* 2017;17(2):307–317. doi: 10.1016/j.acme.2016.10.010

6. Miura Y, Hasegawa M, Sudo A, Pezzotti G, Puppulin L. In-vivo degradation of middle-term highly cross-linked and remelted polyethylene cups: modification induced by creep, wear and oxidation. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials.* 2015;51:13–24.

7. Choudhury D, Ranuša M, Fleming RA, et al. Mechanical wear and oxidative degradation analysis of retrieved ultra-high molecular weight polyethylene acetabular cups. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2018;79:314–323. doi: 10.1016/j.jmbbm.2018.01.003

8. Nabrdalik M, Sobociński M. Modeling of stress and strain distribution in uhmwpe elements of knee and hip human joints. *Acta Phys Pol A.* 2020;138(2):224–227. doi: 10.12693/APhysPolA.138.224

9. Patil NA, Njuguna J, Kandasubramanian B. UHMWPE for Biomedical Applications: Performance and Functionalization. *European Polymer Journal.* 2020;125:109529. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2020

10. Li S, Xu Y, Jing X, et al. Effect of carbonization temperature on mechanical properties and biocompatibility of biochar/ultra-high molecular weight polyethylene composites. *Composites Part B: Engineering.* 2020;196(18):108120.

11. Xu JZ, Muratoglu OK, Oral E. Improved oxidation and wear resistance of ultrahigh molecular weight polyethylene using cross-linked powder reinforcement. *J Biomed Mater Res B.* 2019;107(3):716–723. doi: 10.1002/jbm.b.34165

12. Ruggiero A, Gómez E, Merola M. Experimental comparison on tribological pairs UHMWPE/TIAL6V4 alloy, UHMWPE/AISI316L austenitic stainless and UHMWPE/AL203 ceramic, under dry and lubricated conditions. *Tribology International*. 2016;96:349–360.

13. Hirakawa K, Bauer TW, Stulberg BN, Wilde AH, Secic M. Characterization and comparison of wear debris from failed total hip implants of different types. *J BJS.* 1996;78(8):1235–1243. doi: 10.2106/00004623-199608000-00014

14. Massin P, Achour S. Wear products of total hip arthroplasty: The case of polyethylene. *Morphologie*. 2017;101(17):1–8. doi: 10.1016/j.morpho.2016.06.001

15. Zeman J, Ranuša M, Vrbka M, et al. UHMWPE acetabular cup creep deformation during the run-in phase of THA's life cycle. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials.* 2018;87:30–39. doi: 10.1016/j.jmbbm.2018.07.015

Affatato S, Freccero N, Taddei P. The biomaterials challenge: A comparison of polyethylene wear using a hip joint simulator. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2016;53:40–48. doi: 10.1016/j.jmbbm.2015.08.001
 Verma N, Zafar S, Pathak H. Investigations on thermal damage and surface roughness of laser beam machined nano-hydroxyapatite UHMWPE composites. *Manufacturing Letters*. 2020;25:81–87.

18. Senra MR, Marques MFV, Souza DHS. Ultra-high molecular weight polyethylene bioactive composites with carbonated hydroxyapatite. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials.* 2020;110:103938. doi: 10.1016/j.jmbbm.2020.103938

19. Baena JC, Wu J, Peng Z. Wear performance of UHMWPE and reinforced UHMWPE composites in arthroplasty applications: a review. *Lubricants.* 2015;3(2):413–436. doi: 10.3390/LUBRICANTS3020413

20. Saravanan P, Melk L, Emami N. Mechanical and thermal properties of vitamin E-doped UHMWPE reinforced with hydroxyapatite. *Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces.* 2021;15(3):193–200. doi: 10.1080/17515831.2020.1830252

21. Aliyu IK, Azam MU, Lawal DU, Samad MA. Optimization of SiC Concentration and Process Parameters for a Wear-Resistant UHMWPE Nancocomposite. *Arabian Journal for Science and Engineering.* 2020;45:849–860. doi: 10.1007/s13369-019-04164-3

22. Chang BP, Akil HM, Nasir RM, Nurdijati S. Mechanical and Antibacterial Properties of Treated and Untreated Zinc Oxide filled UHMWPE Composites. *J Thermoplast Compos Mater*. 2011;24(5):653–667. doi: 10.1177/0892705711399848

23. Golchin A, Villain A, Emami N. Tribological behaviour of nanodiamond reinforced UHMWPE in water-lubricated contacts. *Tribol Int.* 2017;110:195–200. doi: 10.1016/j.triboint.2017.01.016

24. Wood W, Li B, Zhong W-H. Influence of phase morphology on the sliding wear of polyethylene blends filled with carbon nanofibers. *Polym Eng Sci.* 2010;50:613–623. doi: 10.1002/pen.21549, 50:613-623
25. Ruan SL, Gao P, Yang XG, Yu TX. Toughening high performance ultrahigh molecular weight polyethylene using multiwalled carbon nanotubes. *Polymer.* 2003;44(19):5643–5654. doi: 10.1016/s0032-3861(03)00628-1

26. Xue Y, Wu W, Jacobs O, Schädel B. Tribological behaviour of UHMWPE/HDPE blends reinforced with multi-wall carbon nanotubes. *Polym Test.* 2006;25:221–229. doi: 10.1016/j.polymertesting.2005.10.005

27. Dayyoub T, Maksimkin AV, Kaloshkin S, et al. The structure and mechanical properties of the UHMWPE films modified by the mixture of graphene nanoplates with polyaniline. *Polymers*. 2018;11(1):23. doi: 10.3390/polym11010023

 Aliyu IK, Mohammed AS, Al-Qutub A. Tribological performance of ultra high molecular weight polyethylene nanocomposites reinforced with graphene nanoplatelets. *Polym Compos.* 2019;40:E1301–E1311.
 Zoo Y-S, An J-W, Lim D-P, Lim, D-S. Effect of Carbon Nanotube Addition on Tribological Behavior of UHMWPE. *Tribology Letters.* 2004;16(4):305–309. doi: 10.1023/b:tril.0000015206.21688.87

30. Vega JF, Martínez-Salazar J, Trujillo M, et al. Rheology. Processing, Tensile Properties, and Crystallization of Polyethylene/Carbon Nanotube Nanocomposites. *Macromolecules*. 2009;42(13):4719–4727. doi: 10.1021/ma900645f

31. Sui G, Zhong WH, Ren X, Wang XQ, Yang XP. Structure, mechanical properties and friction behavior of UHMWPE/HDPE/carbon nanofibers. *Materials Chemistry and Physics.* 2009;115(1):404–412. doi: 10.1016/j.matchemphys.2008.12.016

32. Puértolas JA, Kurtz SM. Evaluation of carbon nanotubes and graphene as reinforcements for UHMWPE-based composites in arthroplastic applications: A review. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. 2014;39:129–145. doi: 10.1016/j.jmbbm.2014.06.013

33. Somberg J, Gonçalves G, Sánchez MS, Emami N. Chemically expanded graphite-based ultra-high molecular weight polyethylene nanocomposites with enhanced mechanical properties. *Materials & Design.* 2022;224:111304. doi: 10.1016/j.matdes.2022.111304

34. Brevnov PN, Kirsankina GR, Zabolotnov AS, et al. Synthesis and properties of nanocomposite materials based on ultra-high-molecular-weight polyethylene and graphite nanoplates. *J Polym Sci.* 2016;58(1):38–49. doi: 10.1134/S1811238216010021

35. Zabolotnov AS, Gostev SS, Gudkov MV, Novokshonova LA, Chelmodeev RI. The influence of ultralow content of graphene on wear-resistant properties of composites based on ultrahigh molecular weight polyethylene. *Polym Sci Series A*. 2023;65(3):296–301.

ОБ АВТОРАХ

Заболотнов Александр Сергеевич, канд. тех. наук; ORCID: 0000-0003-0695-9012; eLibrary SPIN: 6604-4708; e-mail: zabolotnov.ru@gmail.com

Челмодеев Ростислав Игоревич; ORCID: 0000-0002-0444-9070; eLibrary SPIN: 2080-5630; e-mail: cherosz@yandex.ru

Лукина Юлия Сергеевна, канд. тех. наук; ORCID: 0000-0003-0121-1232; eLibrary SPIN: 2814-7745; e-mail: lukina_rctu@mail.ru

Гостев Сергей Сергеевич; ORCID: 0000-0002-3754-3872;

eLibrary SPIN: 6943-7507; e-mail: tmush2017@yandex.ru

* Смоленцев Дмитрий Владимирович; адрес: Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, д. 10; ORCID: 0000-0001-5386-1929; eLibrary SPIN: 3702-1955; e-mail: SmolentsevDV@cito-priorov.ru

Гаврюшенко Николай Свиридович, д-р тех. наук, профессор; ORCID: 0000-0002-7198-433Х; eLibrary SPIN: 3335-6472; e-mail: testlabcito@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

Aleksandr S. Zabolotnov, Cand. Sci. (Engineering); ORCID: 0000-0003-0695-9012; eLibrary SPIN: 6604-4708; e-mail: zabolotnov.ru@gmail.com

Rostislav I. Chelmodeev; ORCID: 0000-0002-0444-9070; eLibrary SPIN: 2080-5630; e-mail: cherosz@yandex.ru

Yulia S. Lukina, Cand. Sci. (Engineering); ORCID: 0000-0003-0121-1232; eLibrary SPIN: 2814-7745; e-mail: lukina_rctu@mail.ru

Sergey S. Gostev; ORCID: 0000-0002-3754-3872; eLibrary SPIN: 6943-7507; e-mail: tmush2017@yandex.ru

* Dmitriy V. Smolentsev; address: 10 Priorova str., 127299 Moscow, Russia; ORCID: 0000-0001-5386-1929; eLibrary SPIN: 3702-1955; e-mail: SmolentsevDV@cito-priorov.ru

Nikolay S. Gavryushenko, Dr. Sci. (Engineering), professor; ORCID: 0000-0002-7198-433X; eLibrary SPIN: 3335-6472; e-mail: testlabcito@mail.ru