

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ / PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

УДК 621.4:620.22-022.532

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202004.576-593

Оригинальная статья



Оптимизация режимов механоактивации сухосмешанных порошков СВМПЭ и наномодификаторов в планетарно-шаровой мельнице Pulverisette 7

В. Н. Водяков, К. А. Куликовская*
ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва»
(г. Саранск, Российская Федерация)
*anata.kulikovskaya@gmail.com

Введение. В настоящее время в различных областях техники бронза, чугун и другие металлы антифрикционного назначения заменяются полимерными композитами, обеспечивающими существенно больший ресурс трибосопряжений. Перспективным антифрикционным полимером является сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Работа посвящена определению оптимальных удельных энергозатрат на механоактивацию сухосмешанных порошков данного полимера и наномодификаторов в планетарно-шаровой мельнице Pulverisette 7, обеспечивающих достижение лучшего комплекса физико-механических и реологических свойств нанокомпозитов.

Материалы и методы. В работе использованы сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки ГУР 4120 Ticona с молекулярной массой 5 млн г/моль, концентрат Tuball Matrix Beta активированных углеродных нанотрубок в концентрации 0,1 % в пересчете на углеродные нанотрубки и гидрофобный нанокристаллический диоксид кремния с дисперсностью 20 нм в такой же концентрации. Совместная механоактивация порошков полимера и наномодификаторов с варьированием удельных энергозатрат проводилась в планетарно-шаровой мельнице Pulverisette 7. Изготовление пленок из порошков для исследования упруго-прочностных и реологических характеристик нанокомпозитов проводилось на гидравлическом прессе Gibitре. Испытания проведены на разрывной машине UAI-7000 М и реометре Нааке MARS III соответственно.

Результаты исследования. Установлено, что при удельных энергозатратах на механоактивацию 3 000–3 200 Дж/г достигается лучший комплекс физико-механических и реологических свойств нанокомпозитов, что позволяет считать их оптимальными. Механоактивация порошка сверхвысокомолекулярного полиэтилена при незначительном снижении модуля упругости и предела прочности термпрессованных образцов не оказывает влияния на динамическую вязкость расплавов при энергозатратах 650–4 550 Дж/г.

Обсуждение и заключение. Введение углеродных нанотрубок и нанокристаллического диоксида кремния в концентрации 0,1 % позволяет значительно улучшить физико-механические и реологические свойства полимера в планетарно-шаровых

© Водяков В. Н., Куликовская К. А., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

мельницах при энергозатратах 3 000–3 200 Дж/г на механоактивацию. Более эффективным модификатором является нанокристаллический диоксид кремния, что объясняется его лучшим диспергированием в полимерной матрице из-за меньшей склонности наночастиц к агломерации.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, углеродные нанотрубки, нанокристаллический диоксид кремния, наноккомпозит, механоактивация, планетарно-шаровая мельница, удельные энергозатраты, физико-механические характеристики, реологические характеристики

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Водяков, В. Н. Оптимизация режимов механоактивации сухосмешанных порошков СВМПЭ и наномодификаторов в планетарно-шаровой мельнице Pulverisette 7 / В. Н. Водяков, К. А. Куликовская. – DOI [10.15507/2658-4123.030.202004.576-593](https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.576-593) // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 576–593.

Original article

Optimization of Mechanical Activation Modes for UHMWPE Dry Mixed Powders and Nanomodifiers in the Planetary Ball Mill Pulverisette 7

V. N. Vodyakov, K. A. Kulikovskaya*

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

**anata.kulikovckaya@gmail.com*

Introduction. Currently, in various technology areas, bronze, cast iron and other antifriction metals are replaced by polymer composites, which extend significantly service life of tribocoupling. An advanced antifriction polymer is ultra-high-molecular-weight polyethylene. The study deals with determining the optimal specific energy consumption for the mechanical activation of the polymer dry mixed powders and nanomodifiers in the planetary ball mill Pulverisette 7, which ensure the best complex of physico-mechanical and rheological properties of nanocomposites.

Materials and Methods. In this work, we used GUR 4120 Ticona ultra-high-molecular-weight polyethylene with a molecular weight of 5 million, a Tuball Matrix Beta concentrate of activated carbon nanotubes at a concentration of 0.1%, calculated with reference to carbon nanotubes, and hydrophobic nanocrystalline silicon dioxide with a dispersion of 20 nm at the same concentration. Mechanical co-activation of polymer powders and nanomodifiers, when varying the specific energy consumption, was carried out in the planetary ball mill Pulverisette 7. The production of films from powders, for studying the elastic-strength and rheological characteristics of nanocomposites, was carried out with the use of the hydraulic press Gibitre. Tests were carried out respectively on the tensile testing machine UAI-7000 M and the rheometer Haake MARS III.

Results. It has been established that the best physico-mechanical and rheological properties of nanocomposites are with specific energy consumption for mechanical activation of 3,000–3,200 J/g that allows us to consider them optimal. The mechanical activation of ultra-high molecular weight polyethylene powder, reducing slightly the elasticity modulus and tensile strength of thermally pressed samples, does not affect the dynamic viscosity of melts at an energy consumption of 650–4,550 J/g.

Discussion and Conclusion. The use of carbon nanotubes and nanocrystalline silicon dioxide at a concentration of 0.1% can significantly improve the physical-mechanical and rheological properties of the polymer with energy costs of 3,000–3,200 J/g for mechanical activation in planetary ball mills. Nanocrystalline silicon dioxide is a more effective modifier that can be explained by its better dispersion in the polymer matrix due to the lower tendency of nanoparticles to agglomerate.

Keywords: ultra-high-molecular-weight polyethylene, carbon nanotubes, nanocrystalline silicon dioxide, nanocomposite, mechanical activation, planetary ball mill, specific energy consumption, physico-mechanical characteristics, rheological characteristics

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Vodyakov V.N., Kulikovskaya K.A. Optimization of Mechanical Activation Modes for UHMWPE Dry Mixed Powders and Nanomodifiers in the Planetary Ball Mill Pulverisette 7. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):576-593. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.576-593>

Введение

В настоящее время в различных областях техники бронза, чугун и другие металлы антифрикционного назначения заменяются полимерными композитами, обеспечивающими существенно больший ресурс трибосопряжений¹ [1]. Актуальность задачи повышения их ресурса обусловлена тем, что выход из строя даже одного из многочисленных узлов трения вызывает остановку машины и, как следствие, технологической системы, что приводит к значительным экономическим потерям.

«Перспективным антифрикционным полимером является сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ). Он обладает высокой ударной вязкостью, влаго- и маслостойкостью, низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью. К недостаткам следует отнести хладотекучесть и относительно невысокие значения упруго-прочностных характеристик, что ограничивает его применение в высоконагруженных узлах трибосопряжений» [1].

«Одним из резервов повышения качества полимерных материалов является применение нанотехнологических подходов» [2]. Применительно к проблеме упрочнения СВМПЭ приоритетным направлением является его модификация нанодисперсными частицами, которые по размеру значительно меньше частиц полимера. В связи с трудоемкостью равномерного диспергирования наноразмерных порошков в высоковязком полимерном объеме из-за сильной тенденции к агрегации смешение их с порошком СВМПЭ проводят, как правило, в планетарно-шаровых мельницах [2–4].

Основной задачей проводимых в настоящее время многочисленных исследований является подбор наиболее эффективных модификаторов, их оптимального содержания в нанокompозитах СВМПЭ, а также оптимальных режимов совместной обработки СВМПЭ и наномодификаторов в планетарно-шаровых мельницах.

Целью настоящей работы является определение оптимальных удельных энергозатрат на механоактивацию сухосмешанных порошков СВМПЭ и наномодификаторов в планетарно-шаровой мельнице Pulverisette 7, обеспечивающих достижение лучшего комплекса физико-механических и реологических характеристик нанокompозитов СВМПЭ.

Обзор литературы

Проведены детальные исследования структуры исходного и механоактивированного в планетарной шаровой мельнице MP/0,5×4 порошка СВМПЭ (фирма Ticona, молекулярная масса 2–7 млн г/моль) с использованием электронного микроскопа, рентгеновского дифрактометра XRD-6000 и ИК-спектрометра [4]. Установлено, что «механоактивация приводит к изменению формы и увеличению эффективной поверхности частиц связующего, разрыву и последующей сшивке углеводородных цепей С–О группами; имеет место уменьшение размера кристаллитов и, соответственно, изменение характера укладки углеводородных цепей в полимере (от частично фибриллярного к ламеллярному); наблюдается измельчение и более плотная упаковка структурных элементов полимера, что способствует повышению его триботехнических и деформационно-прочностных харак-

¹ Машков Ю. К. Трибофизика металлов и полимеров: монография. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. 240 с.

теристик (износостойкость, плотность, модуль упругости, предел текучести, твердость), в частности, росту износостойкости в 4 раза; оптимальное время активации исходных порошков СВМПЭ составляет 20 мин (при более длительной активации перечисленные характеристики не улучшаются)» [4].

Изучены изменения СВМПЭ, происходящие в результате обработки в атриторной мельнице в течение 8 часов при варьировании скорости вращения в диапазоне 200–600 об/мин [5]. Установлено, что при увеличении скорости вращения происходит морфологическое изменение структуры СВМПЭ.

Исследовано механическое измельчение порошка СВМПЭ в различных планетарно-шаровых мельницах [6]. Обработка выполнялась в мельнице SPEX CertiPrep в течение 1, 4, 8 и 16 часов; в мельнице Pulverisette 6 – при скорости вращения 400 об/мин в течение 1, 2, 4, 8, 16 и 24 часов; в атриторной мельнице 01-HD (Union Process) – при скорости вращения 500 об/мин в течение 5, 8, 10 и 15 часов. Установлено, что интенсивность структурных изменений в СВМПЭ зависит от интенсивности напряжений сдвига и длительности обработки. Более значимые фазовые превращения достигнуты в атриторной мельнице.

Изучено влияние многостенных углеродных нанотрубок «Таунит» (МУНТ) в концентрации 2 % на структуру нанокompозитов СВМПЭ [7]. Изготовление образцов осуществлялось совместной обработкой порошков СВМПЭ и МУНТ в мельнице АПФ-3 с последующим их термопрессованием. Использован следующий режим работы: частота вращения 400 об/мин, время обработки 3 мин, пауза 3 мин. Установлено, что такая обработка распределяет МУНТ только по поверхности частиц полимера и распределение не является однородным из-за агломерации наночастиц.

Для сравнительной оценки вклада углеродных нановолокон (УНВ) и углеродных нанотрубок УНТ исследованы механические и триботехнические характеристики нанокompозитов СВМПЭ и полиэфирэфиркетона (ПЭЭК). «Перемешивание порошков СВМПЭ, ПЭЭК и наполнителей в концентрациях 1 масс. % проводилось в мельнице МР/0,5×4 с предварительным диспергированием взвеси компонентов в этиловом спирте в ультразвуковой ванне. Установлено, что износостойкость композитов возрастает в 2 раза при сухом трении скольжения» [8].

В другом исследовании МУНТ в концентрациях 0,3, 0,5, 0,7 и 1,0 масс. % встраивали в матрицу СВМПЭ обработкой в высокоэнергетической мельнице Fritsch Mini Mill II в течение 5 мин с частотой вращения 250 об/мин [9]. Данный цикл повторялся по 25 раз для каждого состава. Установлено, что при концентрации МУНТ 1 % имеет место рост модуля упругости, предела текучести композита при снижении относительного удлинения и предела прочности при растяжении.

Исследовано влияние порошка SiO_2 с размером частиц 5 мкм на механические свойства и износостойкость композитов СВМПЭ при сухом трении скольжения [10]. Установлено, что максимальные значения износостойкости и физико-механических характеристик достигаются в диапазоне концентраций 0,5–1 масс. %. При больших значениях влияние на механические свойства и износостойкость снижалось.

В исследованиях С. В. Панина и коллег совмещение СВМПЭ и наночастиц в мельнице МР/0,5×4 «проводилось с предварительным диспергированием в ультразвуковой ванне взвеси компонентов в этиловом спирте» [11; 12]. Установлено, что твердосмазочные микро- и нанокompозиты имеют более высокую износостойкость, чем исходный СВМПЭ, что обусловлено

формированием микронаполнителями (дисульфид молибдена, графит, стеарат кальция, политетрафторэтилен) и нанонаполнителями (УНТ, SiO_2 , $\text{AlO}(\text{OH})$) пленки переноса на контртеле.

Установлено, что «зависимость коэффициентов трения и износа композита на основе СВМПЭ, наполненного TiO_2 , имеет вид кривой с минимумом при содержании модификатора 3 масс. %» [13]. При указанной величине наполнения достигается восьми-девятикратное снижение износа и коэффициента трения. Введение модификатора в СВМПЭ осуществлялось в реакционной плазмохимической камере дугового разряда низкого давления в рамках единого технологического процесса.

Исследованы трибологические свойства полученных методом полимеризации *in situ* нанокompозитов СВМПЭ с монтмориллонитом, нанопластинами графита, дисульфидом молибдена и шунгитом [14]. Установлено, что при концентрациях 0,4–7 масс. % модификаторы повышают в 2–3 раза износостойкость при трении скольжения по стали.

В другой работе процесс смешения МУНТ с СВМПЭ проводился в мельнице АПФ-3 в течение 45 мин при скорости вращения 450 об/мин [15]. Для изготовления смеси использованы чистые и фторированные МУНТ в концентрации 0,1, 0,5 и 1 масс. %. Итоговым результатом явилось увеличение прочности СВМПЭ при растяжении с 21 до 132 МПа, причем преобладающим фактором упрочнения явилась ориентация полимерных цепей при заметном влиянии фторированных МУНТ.

Представлено покрытие из СВМПЭ, усиленное глиноземом с содержанием 0,5, 3, 5 и 10 масс. % [16]. Установлено, что покрытия, содержащие 3–5 масс. % глинозема, имеют значительно более высокую износостойкость по отношению к покрытию из СВМПЭ. Изготовление композита проводилось сочетанием ультразвукового воздей-

ствия и перемешивания в магнитной мешалке.

Описана композиция СВМПЭ и наноразмерного углеродного порошка УМ-76, полученная диспергированием в течение 1 ч в турбулентном смесителе-диспергаторе со скоростью 20 000 об/мин в горячем жидком стекле с добавкой поверхностно-активного вещества [17]. Установлено снижение механических свойств композита при повышении содержания углеродного наполнителя сверх оптимального значения.

Для улучшения свойств СВМПЭ группой ученых использован оксид графена (ГО) с последующим упрочнением композита обработкой гамма-лучами [18]. Образцы композитов с различной дозировкой ГО (0,1, 0,5 и 1,0 масс. %) получены смешением ГО в спиртовом растворе в течение 3 минут с ультразвуковой обработкой. Затем суспензия смешивалась с порошком СВМПЭ при обработке ультразвуком в течение 1 часа. После удаления спирта полученные продукты измельчали в мельнице с последующим термopрессованием образцов. Установлено улучшение механических свойств нанокompозитов.

В другой работе порошок СВМПЭ совмещался с различным количеством УНТ в шаровой мельнице в течение 2 часов при частоте вращения барабана 200 об/мин, после чего порошки подвергали горячему прессованию [19]. Установлено, что УНТ в количестве до 1,5 масс. % улучшает трибологические свойства. При росте концентрации происходило ухудшение данных свойств.

Сравнение эффективности мельниц АГО-2 и Активатор-2SL при активации порошка титана марки ПТОМ-2 показало, что «введение сопоставимых значений энергии в порошок титана разными мельницами приводит к схожим результатам по качеству объемного распределения частиц» [20].



Ю. А. Веригиным и соавторами разработана математическая модель и определены условия оптимизации процесса помола микрочастиц в шаровых мельницах. Установлено, что «предлагаемая математическая модель позволяет управлять процессом измельчения различных материалов и переносить результаты на шаровые мельницы любых конструкций» [21].

В результате энергетического анализа механоактивации порошковых смесей в мельнице АГО-3 сформулированы следующие важные предположения: «максимальная энергонапряженность мелющих тел на холостом ходу достигается в интервале 30–45 % объема заполнения; большая часть механической энергии двигателя передается водилу и планетарным реакторам от 65 до 70 %, но наблюдается степенной рост ($n \sim 2$) передаваемой энергии при увеличении частоты вращения; удельная энергонапряженность мельницы растет пропорционально кубической степени свободного объема реактора» [22].

Изложены представления о поведении мелющих тел в планетарной шаровой мельнице Pulverisette 7 [23]. Авторы работы отмечают, что разработанная математическая модель, описывающая энергетические характеристики мельницы, является ориентировочной, однако может быть успешно использована при проведении экспериментальных работ, позволяя оценивать величину подводимой к обрабатываемому материалу энергии.

Различными физическими методами исследованы продукты механоактивации порошковой смеси СВМПЭ и карбида бора, которая провела в мельнице с энергонапряженностью 1,1 Вт/г от 5 до 25 мин [24]. Показано, что в этих условиях при отсутствии окислительной деструкции полимера формируются полимерные частицы чешуйчатой формы размером 100–160 мкм с хаотичным распределением в них

наночастиц размером 1–5 мкм. Авторы отмечают, что основными возможными результатами взаимодействия порошков СВМПЭ и наполнителя являются процессы сшивки при некотором вероятном уменьшении молекулярной массы полимера.

Таким образом, из рассмотренных работ следует, что при создании нанокompозитов СВМПЭ наиболее часто для совмещения порошков СВМПЭ и наномодификаторов (УНТ, МУНТ, SiO₂, TiO₂ и др.) используют их совместную обработку (механоактивацию) в планетарно-шаровых мельницах. В большинстве работ отмечено позитивное влияние наномодификаторов в диапазоне концентраций 0,1–1 масс. % на упруго-прочностные и трибологические характеристики нанокompозитов. В ряде работ отмечается значительный разброс экспериментальных значений упруго-прочностных и трибологических характеристик. Причинами являются некачественное распределение и диспергирование наночастиц в объеме полимера из-за их склонности к агломерации. При этом практически отсутствуют публикации, посвященные исследованию влияния механоактивации на реологические свойства полученных нанокompозитов СВМПЭ.

В качестве технологических параметров, характеризующих интенсивность обработки, принимают частоту вращения барабанов, длительность обработки и температуру механоактивации. Очевидно, что в зависимости от конструкции мельницы при одних и тех же параметрах может достигаться различная интенсивность обработки порошков и, следовательно, различный уровень эксплуатационных и технологических характеристик нанокompозитов СВМПЭ.

Объективной характеристикой энергонапряженности процесса, однозначно определяющей достигнутый уровень значений физико-механических, реологических и трибологических ха-

рактических нанокompозитов, может служить показатель удельных энергозатрат на механоактивацию порошков СВМПЭ и наномодификаторов в планетарно-шаровых мельницах.

Материалы и методы

В настоящем исследовании использованы СВМПЭ марки ГУР 4120 Ticona с молекулярной массой 5 млн г/моль и размером частиц 120–150 мкм, концентрат Tuball Matrix Beta активированных углеродных нанотрубок (УНТ) и гидрофобный нанокристаллический диоксид кремния (SiO_2) дисперсностью 20 нм. Концентрации наночастиц, вводимых в СВМПЭ, были приняты в соответствии с работами ряда ученых и составили 0,1 %² [25].

Механоактивация СВМПЭ и сухосмешанных порошков СВМПЭ и модификаторов проводилась в планетарной мельнице Pulverisette 7 (Premium Line), снабженной системой дистанционного (компьютерного) мониторинга давления газов и температуры в размольных стаканах.

Был принят следующий режим работы, исключающий перегрев полимера: «обработка порошка с реверсированием вращения карусели и стаканов, частота вращения водила 1 000 об/мин, время обработки 15 мин, время покоя 15 мин, количество циклов 1–7. Масса загружаемых в каждый контейнер стальных шаров диаметром 3 мм составляла 150 г, порошков СВМПЭ и модификаторов – 20 г» [26].

Исходя из уравнений, полученных ранее, и принятого режима работы, выведена следующая формула для расчета удельной энергии (Дж/г) механоактивации смеси порошков СВМПЭ и модификаторов в мельнице [23]:

$$U_{\text{уд}} = 7,215 \cdot 10^{-10} f^3 t, \quad (1)$$

где f – частота вращения водила и контейнеров мельницы, об/мин; t – полная длительность механоактивации смеси порошков без учета времени покоя, с.

Энергонапряженность процесса ($W_{\text{уд}} = U_{\text{уд}} / t$) составляла 0,72 Вт/г, что согласуется с результатами предыдущих исследований [24]. Максимальная температура порошков в мельнице в течение времени обработки не превышала 90 °С, величина давления соответствовала атмосферному.

Из полученных порошков для каждого состава и режима механоактивации, в соответствии с ранее разработанной методикой, способом термопрессования получались пластины, из которых штанцами вырубали по 5 лопаток (тип 1) для испытаний по ГОСТу 11262-2017 и дисков диаметром 20 мм для динамических испытаний на реометре HAAKE MARS III³ [26; 27].

«Физико-механические испытания проведены на разрывной машине UAI-7000 М при температуре 23 ± 2 °С и скорости растяжения 10 мм/мин. Истинные значения напряжений (МПа) вычисляли по формуле:

$$\sigma = lF / (l_0 A_0), \quad (1)$$

где l и $l_0 = 25$ – значения текущей и рабочей длин образца, мм; A_0 – начальная площадь сечения, мм²; F – текущее значение усилия растяжения, Н.

Деформация растяжения вычислялась в мере Генки по формуле:

$$\varepsilon_{\text{H}} = \ln(l / l_0). \quad (2)$$

Значения начального $E_{\text{н}}$ и конечного $E_{\text{к}}$ модулей упругости (МПа) определяли как тангенсы угла наклона касательных соответственно к начальному и конечному прямолинейным участкам

² Танкова К. И., Ананьева Е. С. Исследование влияния модификации связующего углеродными нанотрубками на свойства однонаправленных образцов // Труды XIV Международной научной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение» / под ред. В. Б. Маркина. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2017. С. 154–158.

³ ГОСТ 11262-2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение.

кривых $\sigma = f(\varepsilon_H)$. Значения пределов вынужденной эластичности и предела прочности принимали равными соответственно условному пределу текучести (ГОСТ 11262-2017) и максимальному значению достигнутого напряжения» [26].

Динамические испытания проведены при амплитуде колебаний рифленого ротора 0,001 рад, угловых скоростях 0–800 с⁻¹ и температурах 150–180 °С. Использование принципа температурно-временной суперпозиции позволило расширить диапазон скоростей до четырех десятичных порядков.

Результаты исследования

На рисунке 1 представлен типичный вид кривых растяжения стандартных образцов, сформированных из СВМПЭ и нанокompозитов СВМПЭ при величине удельных энергозатрат на механоактивацию 3 200 Дж/г.

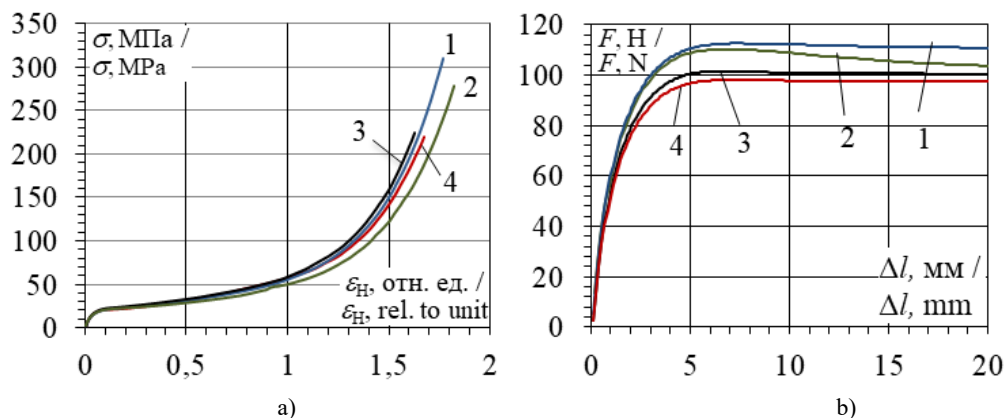
Из графиков видно, что наличие модификатора значительно повышает пределы прочности (рис. 1а) и текучести (рис. 1б) механоактивированного СВМПЭ из-за образования «поперечно сшитых структур» [24].

На рисунке 2 представлены полученные зависимости физико-механических характеристик образцов пластин СВМПЭ и нанокompозита СВМПЭ + 0,1 % УНТ от удельных энергозатрат на механоактивацию порошков.

Как следует из графиков, механоактивация порошка СВМПЭ приводит с ростом удельных энергозатрат от 650 до 4 550 Дж/г к незначительному (в пределах 3–5 %) снижению прочности и конечного модуля упругости полимера, что согласуется с результатами другой работы [4].

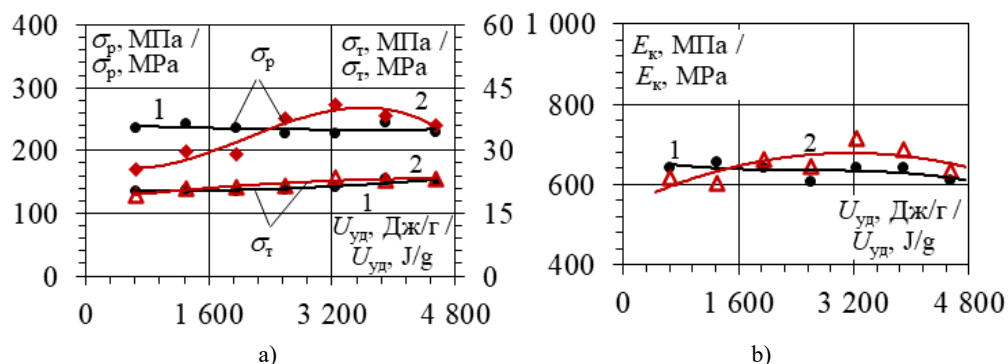
В отличие от СВМПЭ весь комплекс упруго-прочностных характеристик образцов нанокompозита СВМПЭ + 0,1 % УНТ заметным образом зависит от величины удельных энергозатрат на совместную обработку сухосмешанных порошков в планетарно-шаровой мельнице.

При малых (600–2 000 Дж/г) значениях энергозатрат упруго-прочностные характеристики СВМПЭ заметно превосходят характеристики нанокompозита, что можно объяснить неудовлетворительным качеством дисперги-



Р и с. 1. Типичные кривые растяжения образцов СВМПЭ и нанокompозитов на его основе (а) и их поведение в области предела текучести (б): 1 – СВМПЭ + SiO₂; 2 – СВМПЭ + УНТ; 3 – СВМПЭ с механоактивацией (3 200 Дж/г); 4 – СВМПЭ без механоактивации

F i g. 1. Typical stretching curves of samples of UHMWPE and nanocomposites based on it (a) and their behavior in the yield point region (b): 1 – UHMWPE + SiO₂; 2 – UHMWPE + CNT; 3 – UHMWPE with mechanical activation (3,200 J/g); 4 – UHMWPE without mechanical activation



Р и с. 2. Зависимость пределов прочности σ_p и текучести σ_T (а), конечного E_k модуля упругости (б) пластин СВМПЭ (1) и нанокompозита СВМПЭ + 0,1 % УНТ (2) от удельных энергозатрат на механоактивацию сухосмешанных порошков

F i g. 2. Dependence of tensile strength σ_p and yield strength σ_T (a), final E_k elastic module (b) of UHMWPE plates (1) and UHMWPE + 0.1 % CNT nanocomposite (2) on specific energy consumption for mechanical activation of dry mixed powders

рования УНТ в объеме СВМПЭ. Согласно структурным исследованиям, проведенным Т. А. Охлопковой, в композите в этом случае «присутствуют дефектные области с агломерированными наночастицами наполнителя, которые при приложении внешней нагрузки выступают в качестве концентраторов напряжения, снижающих механические свойства полимерного композиционно-материала»⁴. При увеличении удельных энергозатрат до 3 000–3 200 Дж/г значения всего комплекса упруго-прочностных характеристик достигают максимума, что связано с «формированием в объеме композита устойчивой пространственной сетки физических связей адсорбционного типа с образованием в периферии наночастицы граничного слоя с повышенной степенью упорядоченности в результате действия ее силового поля»⁵.

При дальнейшем увеличении энергозатрат имеет место заметное снижение упруго-прочностных характеристик сформированных образцов нанокompозитов, обусловленное «агломерацией по-

рошков, вызванной высокой эффективной поверхностью частиц» [7].

Из полученных результатов следует, что оптимальные удельные энергозатраты на механоактивацию порошков СВМПЭ и наномодификаторов в планетарной мельнице составляют 3 000–3 200 Дж/г. Усредненные значения физико-механических характеристик исследованных нанокompозитов и результаты их статобработки представлены в таблице.

Из таблицы следует, что большее влияние на упруго-прочностные характеристики СВМПЭ оказывает нанокристаллический диоксид кремния SiO_2 (состав 1). Его ввод в сверхмалой концентрации 0,1 % обеспечивает повышение предела прочности СВМПЭ на 27,5 %, конечного E_k и начального E_n модулей упругости соответственно на 22,8 % и 6 %, предела текучести на 4,5 %.

Наличие в СВМПЭ активированных углеродных нанотрубок в концентрации 0,1 % обеспечивает рост предела прочности на 15,6 %, предела текуче-

⁴ Охлопкова Т. А. Триботехнические материалы на основе СВМПЭ, модифицированного наноразмерными оксидными керамиками: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2018. 160 с.

⁵ Авдейчик С. В. Введение в физику нанокompозиционных машиностроительных материалов. Гродно: ГГАУ, 2009. 439 с.

Физико-механические характеристики нанокompозитов СВМПЭ при оптимальной энергии механоактивации**Physico-mechanical characteristics of UHMWPE nanocomposites with optimal mechanical activation energy**

Составы согласно рисунку 1 / Compositions according to Figure 1	σ_p , МПа / σ_p , МПа	σ_r , МПа / σ_r , МПа	$E_{и^*}$, МПа / $E_{и^*}$, МПа	$E_{к^*}$, МПа / $E_{к^*}$, МПа	$\epsilon_{и^*}$, отн. ед / $\epsilon_{и^*}$, relative to unit
1	301,7 ± 2,2	22,8 ± 0,8	766,2 ± 28,9	810,5 ± 42,8	1,76 ± 0,01
2	274,3 ± 22,5	23,4 ± 0,9	755,7 ± 47,5	715,7 ± 39,3	1,76 ± 0,03
3	228,4 ± 26,8	21,0 ± 1,4	718,9 ± 61,7	641,9 ± 87,5	1,66 ± 0,03
4	236,7 ± 37,6	21,8 ± 1,8	723,1 ± 32,5	659,8 ± 96,3	1,64 ± 0,06

сти на 7,3 %, конечного и начального модулей упругости на 8,5 % и 4,5 %.

Кроме этого, установлено, что «в условиях трения со смазкой введение УНТ обеспечивает снижение коэффициента трения СВМПЭ на 6 %, а интенсивности изнашивания на 33 %» [26].

На рисунке 3 представлены частотные зависимости комплексной вязкости η^* расплавов нанокompозитов для трех составов при оптимальном значении энергозатрат на механоактивацию. Результаты в диапазоне четырех порядков изменения угловой скорости ротора реометра описываются с коэффициентом корреляции не ниже 0,99 степенной зависимостью Оствальда – де Ваале:

$$\eta^* = k\omega^{n-1}, \quad (5)$$

где k – коэффициент консистенции, Па·с ^{n} ; n – индекс течения.

Ярко выраженное неньютоновское поведение можно объяснить очень высокой молекулярной массой СВМПЭ, макромолекулы которого требуют дли-

тельного времени релаксации из-за большого количества переплетений.

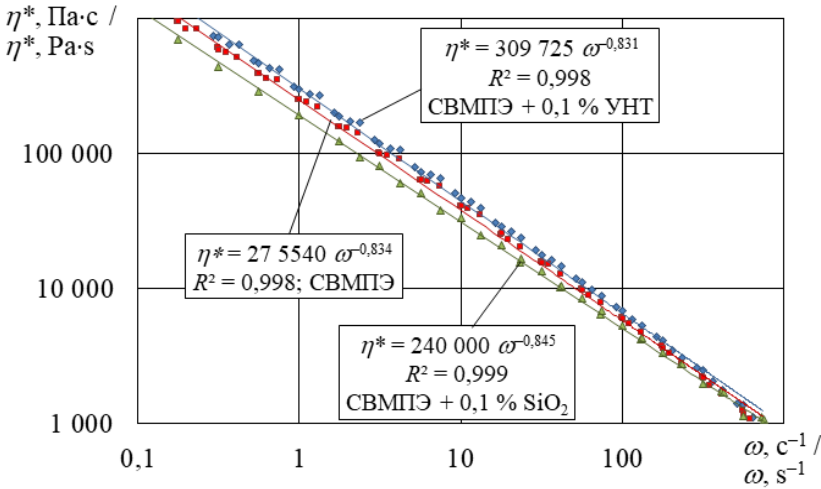
Из графиков следует, что ввод УНТ в полимер приводит к заметному росту комплексной вязкости расплава СВМПЭ из-за высокой структурности данного модификатора. Лучшие реологические свойства достигаются при вводе в СВМПЭ двуокиси кремния SiO₂.

На рисунке 4 представлена зависимость параметров реологической модели Оствальда – де Ваале от удельных энергозатрат на механоактивацию в шаровой мельнице порошков СВМПЭ (1) и СВМПЭ + 0,1 % УНТ (2).

Из графиков видно, что механоактивация порошка СВМПЭ практически не оказывает влияния на указанные реологические параметры в исследованном диапазоне удельных энергозатрат 0–4 550 Дж/г.

Как известно, вязкость расплава полимера зависит от размера и числа сегментов, входящих в макромолекулярные цепи⁶. Механоактивация СВМПЭ в исследованном диапазоне удельных

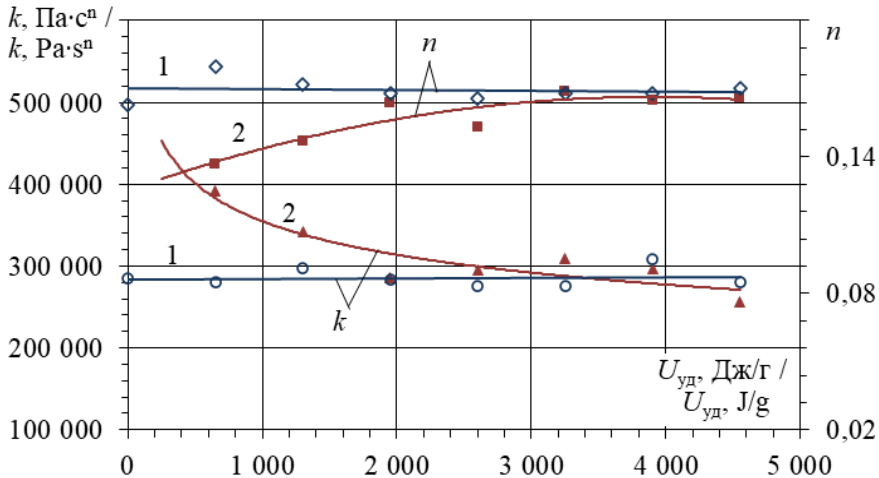
⁶ Малкин А. Я., Исаев А. И. Реология: концепции, методы, приложения / пер. с англ. СПб.: Профессия, 2007. 560 с.



Р и с. 3. Зависимость комплексной вязкости расплавов нанокompозитов от угловой скорости ротора при температуре 180 °С: 1 – механоактивированный СВМПЭ; 2 – нанокompозит СВМПЭ + 0,1 % УНТ; 3 – нанокompозит СВМПЭ + 0,1 % SiO₂
 F i g. 3. Dependence of the complex viscosity of nanocomposites melts on the angular velocity of the rotor at a temperature of 180 °С: 1 – mechanically activated UHMWPE; 2 – nanocomposite UHMWPE + 0.1% CNT; 3 – nanocomposite UHMWPE + 0.1% SiO₂

энергoзатрат видимо не изменяет размеры сегментов, имеющих длину порядка нескольких десятков или сотен мономерных единиц.

В отличие от этого коэффициент *k* нанокompозита СВМПЭ + 0,1 % УНТ в диапазоне энергoзатрат 650–3 200 Дж/г снижается на 26 %, а индекс течения



Р и с. 4. Зависимость параметров реологической модели Оствальда при температуре 180 °С от удельных энергoзатрат на механоактивацию порошков СВМПЭ (1) и СВМПЭ + 0,1 % УНТ (2)
 F i g. 4. Dependence of the parameters of the Ostwald rheological model at a temperature of 180 °С on the specific energy costs for the mechanical activation of UHMWPE (1) and UHMWPE powders + 0.1% CNTs (2)

n возрастает на 23 %. В целом это обуславливает снижение комплексной вязкости для изученного диапазона угловых скоростей на 1,5–36 %.

Бликие результаты получены в работе, в которой при температуре 210 °С изучено реологическое поведение СВМПЭ, модифицированного 1 масс. % УНТ [28]. Установлено, что добавление активированных и не активированных ультразвуком УНТ приводит к росту значений комплексной вязкости в диапазоне угловых скоростей 10^{-2} – 10^2 с⁻¹. Необработанные УНТ оказывают более заметное влияние на комплексную вязкость нанокompозита, вызывая значительное увеличение ее значений по сравнению с чистым полимером. При этом эффект от нанонаполнителей постепенно уменьшается с увеличением времени обработки УНТ ультразвуком, что обусловлено «деградацией структур УНТ и невозможностью формирования перколяционной сети» [28].

Обсуждение и заключение

Из вышеприведенных результатов следует, что использование для модификации СВМПЭ углеродных нанотрубок в составе концентрата Tuball Matrix Beta и гидрофобного нанокристаллического диоксида кремния (SiO₂) дисперсностью 20 нм в оптимальных концентрациях 0,1 % позволяет значимо улучшить физико-механические (эксплуатационные) характеристики СВМПЭ без ухудшения его реологических (технологических) свойств.

Установлено, что лучший комплекс эксплуатационных свойств нанокompозитов достигается при совместной обработке (механоактивации) сухомешанных порошков СВМПЭ и наномодификаторов в планетарно-шаровой мельнице в диапазоне удельных энергозатрат 3 000–3 200 Дж/г. При этом

механоактивация порошка СВМПЭ приводит с ростом удельных энергозатрат в диапазоне 650–4 550 Дж/г к незначительному (в пределах 3–5 %) снижению значений прочности начального и конечного модулей упругости полимера, что согласуется с результатами известных работ.

Исходя из полученных значений пределов текучести (22,8 МПа) и прочности (301,7 МПа) нанокompозита СВМПЭ + 0,1 % SiO₂, можно заключить, что уровень рабочих напряжений для антифрикционных деталей, полученных твердофазным формованием нанокompозитов СВМПЭ, может быть увеличен в несколько раз.

Динамическими испытаниями установлено, что механоактивация порошка СВМПЭ в диапазоне удельных энергозатрат 0–4 550 Дж/г не изменяет значений параметров (коэффициента консистенции k и индекса течения n) степенной зависимости Оствальда – де Ваала. В отличие от этого коэффициент консистенции нанокompозита СВМПЭ + 0,1 % УНТ в диапазоне энергозатрат 650–4 550 Дж/г снижается на 26 %, а индекс течения n возрастает на 23 %, что обуславливает снижение комплексной вязкости расплава для изученного диапазона угловых скоростей 10^{-1} – 10^3 с⁻¹ на 1,5–36 %.

Прикладная технико-экономическая значимость полученных результатов заключается в том, что они открывают перспективы использования исследованных нанокompозитов для изготовления методом твердофазного формования высокоресурсных антифрикционных деталей сельскохозяйственной техники: подшипников скольжения, направляющих, комбинированных уплотнений, грязесъемных колец гидроцилиндров и других деталей аналогичного назначения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Износостойкие полимерные материалы. Структура и свойства / Н. Т. Кахраманов, Г. Ш. Касумова, В. С. Осипчик, Р. Ш. Гаджиева // Пластические массы. – 2017. – № 11–12. – С. 8–15. – URL: <https://www.plastics-news.ru/jour/article/view/213> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.
2. Композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: свойства, перспективы использования / Г. Е. Селютин, Ю. Ю. Гаврилов, Е. Н. Воскресенская [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. – 2010. – Т. 18, № 3. – С. 375–388. – URL: <http://sciact.catalysis.ru/ru/public/article/5698> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.
3. Наноструктурированные композиты и полимерное материаловедение / Н. Т. Кахраманов, А. Г. Азизов, В. С. Осипчик [и др.] // Пластические массы. – 2016. – № 1–2. – С. 49–57. – URL: https://www.plastics-news.ru/jour/article/view/18?locale=ru_RU (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.
4. Влияние механической активации сверхвысокомолекулярного полиэтилена на его механические и триботехнические свойства / В. Е. Панин, С. В. Панин, Л. А. Корниенко [и др.] // Трение и износ. – 2010. – Т. 31, № 2. – С. 168–176. – URL: <https://mpri.org.by/izdaniya/trenie-i-iznos/2010-tom-31-n-1-6.html> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.
5. Structural Modifications of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Processed in Attritor Type Mill / M. C. Gabriel, B. M. Carvalho, L. A. Pinheiro [et al.] // 7th International Latin American Conference on Powder Technology, November 08-10. – Atibaia, 2009. – Pp. 337–341. – URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/116/47116488.pdf (дата обращения: 21.10.2020).
6. High-Energy Mechanical Milling of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) / M. C. Gabriel, L. B. Mendes, B. M. Carvalho [et al.]. – DOI [10.4028/www.scientific.net/msf.660-661.325](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.660-661.325) // Materials Science Forum. – 2010. – Vol. 660–661. – Pp. 325–328. – URL: <https://www.scientific.net/MSF.660-661.325> (дата обращения: 21.10.2020).
7. **Медведева, Е. В.** Структура содержащих неравноосные неорганические включения полимерных композиционных материалов / Е. В. Медведева, В. В. Чердынцев // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=10459> (дата обращения: 21.10.2020).
8. Влияние углеродных нановолокон/нанотрубок на формирование физико-механических и триботехнических характеристик полимерных композитов на основе термопластичных матриц СВМПЭ и ПЭЭК / С. В. Панин, Л. А. Корниенко, В. О. Алексенко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». – 2017. – Т. 60, № 9. – С. 45–51. – URL: <http://journals.isuct.ru/ctj/article/view/200> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.
9. **Campos, N.** Incorporation of Carbon Nanotubes into Ultra High Molecular Weight Polyethylene by High Energy Ball Milling / N. Campos, A. M. Visco. – DOI [10.1080/1023666X.2010.510110](https://doi.org/10.1080/1023666X.2010.510110) // International Journal of Polymer Analysis and Characterization. – 2010. – Vol. 15, Issue 7. – Pp. 438–449. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1023666X.2010.510110> (дата обращения: 21.10.2020).
10. Influence of SiO₂ Micro- Particles on Microstructure, Mechanical Properties and Wear Resistance of UHMWPE Based Composite under Dry Sliding Friction / N. Puangmalee, N. Sonjaitham, S. Saengthip [et al.]. – DOI [10.4028/www.scientific.net/kem.769.152](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.769.152) // Key Engineering Materials. – 2018. – Vol. 769. – Pp. 152–157. – URL: <https://www.scientific.net/KEM.769.152> (дата обращения: 21.10.2020).
11. Механические и триботехнические характеристики многокомпонентных твердосмазочных композитов на матрице сверхвысокомолекулярного полиэтилена / С. В. Панин, В. О. Алексенко, Л. А. Корниенко [и др.]. – DOI [10.6060/ivkkt.20186111.11y](https://doi.org/10.6060/ivkkt.20186111.11y) // Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». – 2018. – Т. 61, № 11. – С. 88–95. – URL: <http://journals.isuct.ru/ctj/article/view/747> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.
12. Role of Micro- and Nanofillers in Abrasive Wear of Composites Based on Ultra-High Molecular Weight Polyethylene / S. V. Panin, L. A. Kornienko, N. X. Thuc [et al.]. – DOI [10.4028/www.scientific.net](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net)

net/amr.1040.148 // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1040. – Pp. 148–154. – URL: <https://www.scientific.net/AMR.1040.148> (дата обращения: 21.10.2020).

13. Получение и применение модифицированного наночастицами сверхвысокомолекулярного полиэтилена / Л. Ю. Федоров, И. В. Карпов, А. В. Ушаков, А. А. Лепешев // Решетневские чтения. – 2013. – Т. 1, № 17. – С. 482–484. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poluchenie-i-primeneniemodifitsirovannogo-nanochastitsami-sverhvyssokomolekulyarnogo-polietilena/viewer> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.

14. **Заболотнов, А. С.** Износостойкость композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с наполнителями разного типа / А. С. Заболотнов, П. Н. Бревнов, В. В. Акульшин // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2017. – № 12. – С. 13–19. – URL: https://www.researchgate.net/publication/322085046_Iznosostojkost_kompozicionnyh_materialov_na_osnove_sverhvyssokomolekulyarnogo_polietilena_s_napolnitelami_raznogo_tipa/comments (дата обращения: 21.10.2020).

15. Bulk Oriented Nanocomposites of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Reinforced with Fluorinated Multiwalled Carbon Nanotubes with Nanofibrillar Structure / A. V. Maksimkin, A. V. Kharitonov, A. P. Mostovaya [et al.]. – DOI 10.1016/j.compositesb.2016.03.061 // Composites Part B: Engineering. – 2016. – Vol. 94. – Pp. 292–298. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836816301068?via%3Dihub> (дата обращения: 21.10.2020).

16. **Mohammed, A. S.** UHMWPE Nanocomposite Coatings Reinforced with Alumina (Al₂O₃) Nanoparticles for Tribological Applications / A. S. Mohammed. – DOI 10.3390/coatings8080280 // Coatings. – 2018. – Vol. 8, Issue 8. – Pp. 280. – URL: <https://www.mdpi.com/2079-6412/8/8/280> (дата обращения: 21.10.2020).

17. **Gulbin, V. N.** Structure and Microwave Absorbing Properties of Carbon-Filled Ultra-High Molecular Weight Polyethylene / V. N. Gulbin, V. V. Tcherdyntsev. – DOI 10.1515/secm-2015-0431 // Science and Engineering of Composite Materials. – 2018. – Vol. 25, Issue 1. – Pp. 153–157. – URL: <https://www.degruyter.com/view/journals/secm/25/1/article-p153.xml> (дата обращения: 21.10.2020).

18. The Influence of Irradiation on Thermal and Mechanical Properties of UHMWPE/GO Nanocomposites / Z. Ni, W. Pang, G. Chen [et al.]. – DOI 10.1134/s1070427217110234 // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2017. – Vol. 90, Issue 11. – Pp. 1876–1882. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1070427217110234> (дата обращения: 21.10.2020).

19. **Lawal, D.** Tribological Investigations of Carbon Nanotube-Reinforced Polymer (UHMWPE) Nanocomposites Using Taguchi Methodology / D. Lawal, A. B. Ali, A. S. Mohammed. – DOI 10.1002/app.44018 // Journal of Applied Polymer Science. – 2016. – Vol. 133, Issue 40. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.44018> (дата обращения: 21.10.2020).

20. Сравнение эффективности мельниц «АГО-2» и «Активатор-2СЛ» при механической активации порошка титана / В. А. Полубояров, О. П. Солоненко, А. А. Жданок [и др.] – DOI 10.17516/1999-494X-2017-10-5-646-656 // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – Т. 10, № 5. – С. 646–656. – URL: <http://journal.sfu-kras.ru/en/article/33855> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.

21. **Веригин, Ю. А.** Разработка закономерностей оптимизации процессов механического измельчения материалов в строительстве / Ю. А. Веригин, Л. Ю. Маликова, Я. Ю. Веригина // Ползуновский вестник. – 2014. – № 1. – С. 47–52. – URL: http://elib.altstu.ru/journals/Files/pv2014_01/pdf/047verigin.pdf (дата обращения: 21.10.2020).

22. **Бороненко, М. П.** Контроль энергии измельчения и механоактивации планетарной мельницы АГО-3 / М. П. Бороненко, В. В. Лавриков, А. Е. Серегин // Вестник Югорского государственного университета. – 2016. – № 2 (41). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontrol-energii-izmelcheniya-i-mehanoaktivatsii-planetarnoy-melnitsy-ago-3> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.

23. **Кузьмич, Ю. В.** Модель энергетических характеристик планетарной мельницы / Ю. В. Кузьмич, В. Г. Коротков // Труды Кольского научного центра РАН. – 2015. – № 5 (31). – С. 380–384. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-energeticheskikh-harakteristik-planetarnoy-melnitsy> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.

24. Влияние механической активации на структуру композиционных порошков на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненного карбидом бора / В. И. Жорник, С. А. Ковалева, М. А. Белоцерковский [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2018. – № 11. – С. 58–63. – Рез. англ.

25. **Охлопкова, А. А.** Управление процессами структурообразования в полимерных композиционных материалах на основе СВМПЭ / А. А. Охлопкова, Т. А. Охлопкова, Р. В. Борисова // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2015. – № 2 (78). – С. 85–90. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-protsessami-strukturoobrazovaniya-v-polimernyh-kompozitsionnyh-materialah-na-osnove-svmpe-1> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.

26. **Куликовская, К. А.** Влияние сверхмалых концентраций углеродных нанотрубок на упруго-прочностные, реологические и трибологические характеристики сверхвысокомолекулярного полиэтилена / К. А. Куликовская, В. Н. Водяков // Вестник Казанского технологического университета. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 75–78 – URL: <http://sciencerm.ru/Publications/Details/43> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.

27. **Куликовская, К. А.** Исследование физико-механических и реологических характеристик нанокмозитов сверхвысокомолекулярного полиэтилена / К. А. Куликовская, В. Н. Водяков, А. А. Шабарин. – DOI 10.6060/ivkkt.20196211.5988 // Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». – 2019. – Т. 62, № 11. – С. 112–116. – URL: <http://journals.isuct.ru/ctj/article/view/1741> (дата обращения: 21.10.2020). – Рез. англ.

28. Sonication-Induced Modification of Carbon Nanotubes: Effect on the Rheological and Thermo-Oxidative Behaviour of Polymer-Based Nanocomposites / R. Arrigo, R. Teresi, C. Gambarotti [et al.]. – DOI 10.3390/ma11030383 // Materials. – 2018. – Vol. 11, Issue 3. – Pp. 383. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/3/383> (дата обращения: 21.10.2020).

Поступила 05.05.2020; принята к публикации 10.07.2020; опубликована онлайн 30.12.2020

Об авторах:

Водяков Владимир Николаевич, профессор кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4687-1798>, vnvod@mail.ru

Куликовская Ксения Анатольевна, аспирант кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9386-0939>, anata.kulikovckaya@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

В. Н. Водяков – постановка задачи исследования, разработка методики и редактирование статьи; К. А. Куликовская – анализ литературных данных, проведение экспериментальных работ и статистическая обработка полученных результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Kakhramanov N.T., Gasumova G.Sh., Osipchik V.S., et al. Wearproof Polymeric Materials. Structure and Properties. *Plasticheskie Massy* = Plastics. 2017; (11-12):8-15. Available at: <https://www.plastics-news.ru/jour/article/view/213> (accessed 21.10.2020). (In Russ.)

2. Selyutin G.E., Gavrillov Y.Y., Voskresenskaya E.N., et al. Composite Materials Based on Ultrahigh-Molecular Polyethylene: Properties, Outlooks for Use. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya* =

Chemistry for Sustainable Development. 2010; 18(3):375-388. Available at: <http://sciact.catalysis.ru/public/article/5698> (accessed 21.10.2020). (In Russ.)

3. Kakhramanov N.T., Azizov A.G., Osipchik V.S., et al. Nanostructured Composites and Polymeric Materials Technology. *Plasticheskie Massy*. 2016; (1-2):49-57. Available at: https://www.plastics-news.ru/jour/article/view/18?locale=ru_RU (accessed 21.10.2020). (In Russ.)

4. Panin V.Ye., Panin S.V., Kornienko L.A., et al. Effect of Mechanical Activation of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene on Its Mechanical and Tribotechnology Properties. *Trenie i iznos = Journal of Friction and Wear*. 2010; 31(2):168-176. Available at: <https://mpri.org.by/izdaniya/trenie-i-iznos/2010-tom-31-n-1-6.html> (accessed 21.10.2020). (In Russ.)

5. Gabriel M.C., Carvalho B.M., Pinheiro L.A., et al. Structural Modifications of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Processed in Attritor Type Mill. In: 7th International Latin American Conference on Powder Technology, November 08-10. Atibaia; 2009. Pp. 337-341. Available at: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/116/47116488.pdf (accessed 21.10.2020).

6. Gabriel M.C., Mendes L.B., Carvalho B.M., et al. High-Energy Mechanical Milling of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE). *Materials Science Forum*. 2010; 660-661:325-328. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.660-661.325>

7. Medvedeva Ye.V., Cherdyn'tsev V.V. [Structure of Polymer Composite Materials Containing Non-Uniform Inorganic Inclusions]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2013; (5). Available at: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=10459> (accessed 21.10.2020). (In Russ.)

8. Panin S.V., Kornienko L.A., Aleksenko V.O., et al. Influence of Nanofibers/Nanotubes on Physical-Mechanical and Tribotechnical Properties of Polymer Composites Based on Thermoplastic UHMWPE and PEEK Matrixes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya "Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya"* = Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology. 2017; 60(9):45-51. Available at: <http://journals.isuct.ru/ctj/article/view/200> (accessed 21.10.2020). (In Russ.)

9. Campo N., Visco A.M. Incorporation of Carbon Nanotubes into Ultra High Molecular Weight Polyethylene by High Energy Ball Milling. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*. 2010; 15(7):438-449. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/1023666X.2010.510110>

10. Puangmalee N., Sonjaitham N., Saengthip S., et al. Influence of SiO₂ Micro-Particles on Microstructure, Mechanical Properties and Wear Resistance of UHMWPE Based Composite under Dry Sliding Friction. *Key Engineering Materials*. 2018; 769:152-157. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.769.152>

11. Panin S.V., Aleksenko V.O., Kornienko L.A., et al. Mechanical and Tribotechnical Properties of Multicomponent Solid Lubricant Composites Based on Ultra High Molecular Weight Polyethylene. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya "Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya"* = Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology. 2018; 61(11):88-95. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20186111.11y>

12. Panin S.V., Kornienko L.A., Thuc N.X., et al. Role of Micro- and Nanofillers in Abrasive Wear of Composites Based on Ultra-High Molecular Weight Polyethylene. *Advanced Materials Research*. 2014; 1040:148-154. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1040.148>

13. Fedorov L.Yu., Karpov I.V., Ushakov A.V., et al. Manufacturing and Applying the UHMWPE Modified of Nanoparticles. *Reshetnevskie chteniya = Readings in Memory of Reshetnev*. 2013; 1(17):482-484. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/poluchenie-i-primeneniye-modifitsirovannogo-nanochastitsami-sverhvysokomolekulyarnogo-polietilena/viewer> (accessed 21.10.2020). (In Russ.)

14. Zabolotnov A.S., Brevnov P.N., Akulshin V.V. [Wear Resistance of Composite Materials Based on Ultra-High Molecular Weight Polyethylene with Different Types of Fillers]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik = All Materials. Encyclopedic Handbook*. 2017; (12):13-19. Available at: https://www.researchgate.net/publication/322085046_Iznosostojkost_kompozicionnyh_materialov_na_osnove_sverhvysokomolekulyarnogo_polietilena_s_napolnitelami_raznogo_tipa/comments (accessed 21.10.2020). (In Russ.)

15. Maksimkin A.V., Kharitonov A.V., Mostovaya A.P., et al. Bulk Oriented Nanocomposites of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Reinforced with Fluorinated Multiwalled Carbon Nanotubes with Nanofibrillar Structure. *Composites Part B: Engineering*. 2016; 94:292-298. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.03.061>
16. Mohammed A.S. UHMWPE Nanocomposite Coatings Reinforced with Alumina (Al₂O₃) Nanoparticles for Tribological Applications. *Coatings*. 2018; 8(8):280. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings8080280>
17. Gulbin V.N., Tcherdyntsev V.V. Structure and Microwave Absorbing Properties of Carbon-Filled Ultra-High Molecular Weight Polyethylene. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2018; 25(1):153-157. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1515/secm-2015-0431>
18. Ni Z., Pang W., Chen G., et al. The Influence of Irradiation on Thermal and Mechanical Properties of UHMWPE/GO Nanocomposites. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2017; 90(11):1876-1882. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/s1070427217110234>
19. Lawal D., Ali A.B., Mohammed A.S. Tribological Investigations of Carbon Nanotube-Reinforced Polymer (UHMWPE) Nanocomposites Using Taguchi Methodology. *Journal of Applied Polymer Science*. 2016; 133(40). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/app.44018>
20. Poluboyarov V.A., Solonenko O.P., Zhdanok A.A., et al. Comparison of the Efficiency of the Mills “AGO-2” and “Activator-2SL” at the Mechanical Activation of Titanium Powder. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2017; 10(5):646-656. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2017-10-5-646-656>
21. Verigin Yu.A., Malikova L.Yu., Verigina Ya.Yu. [Development of the Regularities for Optimization of the Processes of Mechanical Crushing of Materials in Construction]. *Polzunovskiy vestnik* = Polzunov's Bulletin. 2014; (1):47-52. Available at: http://elib.altstu.ru/journals/Files/pv2014_01/pdf/047verigin.pdf (accessed 21.10.2020). (In Russ.)
22. Boronenko M.P., Lavrikov V.V., Seregin A.Ye. Energy Control and Grinding Mechanoactivation Planetary Mill AGO-3. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta* = Yugra State University Bulletin. 2016; (2). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontrol-energii-izmelcheniya-i-mehanoaktivatsii-planetarnoy-melnitsy-ago-3> (accessed 21.10.2020). (In Russ.)
23. Kuzmich Yu.V., Korotkov V.G. Simulation of the Energy Characteristics of the Planetary Mill. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN* = Works of the Kola Scientific Center of the RAS. 2015; (5):380-384. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-energeticheskikh-harakteristik-planetarnoy-melnitsy> (accessed 21.10.2020). (In Russ.)
24. Zhornik V.I., Kovaleva S.A., Belotserkovskiy M.A., et al. Influence of Mechanical Activation on Structure of Composite Powders Based on Ultrahigh-Molecular Weight Polyethylene Filled by Boron Carbide. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost. Prikladnye nauki* = Polotsk State University Bulletin. Series B. Industry. Applied Sciences. 2018; (11):58-63. (In Russ.)
25. Okhlopkova A.A., Okhlopkova T.A., Borisova R.V. [Structural Formation Processes Management in Polymer Composite Materials Based on UHMWPE]. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktki* = Arctic and Subarctic Natural Resources. 2015; (2):85-90. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-protssami-strukturoobrazovaniya-v-polimernyh-kompozitsionnyh-materialah-na-osnove-svmpe-1> (accessed 21.10.2020). (In Russ.)
26. Kulikovskaya K.A., Vodyakov V.N. Effects Provided by the Ultra-Low Concentrations of Carbon Nanotubes on the Stress-Related, Rheological and Tribological Characteristics of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* = Kazan Technological University Bulletin. 2019; 22(2):75-78. Available at: <http://sciencerm.ru/Publications/Details/43> (accessed 21.10.2020). (In Russ.)
27. Kulikovskaya K.A., Vodyakov V.N., Shabarin A.A. Investigation of Physico-Mechanical and Rheological Characteristics of Nanocomposites of Ultrahigh-Molecular Polyethylene. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya “Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya”* = Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology. 2019; 62(11):112-116. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196211.5988>

28. Arrigo R., Teresi R., Gambarotti C., et al. Sonication-Induced Modification of Carbon Nanotubes: Effect on the Rheological and Thermo-Oxidative Behaviour of Polymer-Based Nanocomposites. *Materials*. 2018; 11(3):383. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11030383>

Received 05.05.2020; revised 10.07.2020; published online 30.12.2020

About the authors:

Vladimir N. Vodyakov, Professor of Chairs of Mechanization of Agricultural Processing of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4687-1798>, vnvod@mail.ru

Kseniya A. Kulikovskaya, Postgraduate Student of Chairs of Mechanization of Agricultural Processing of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9386-0939>, anata.kulikovckaya@gmail.com

Contribution of the authors:

V. N. Vodyakov – formulation of the research task, development of methods and editing the article; K. A. Kulikovskaya – literary data analysis, experimental works and statistical processing of the obtained results.

All authors have read and approved the final manuscript.