

DOI: 10.32864/polymmattech-2021-7-1-60-70

УДК 678.8:678.046:530.145

РОЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ФАКТОРА В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

С. В. АВДЕЙЧИК^{1,2}, В. А. СТРУК², А. С. АНТОНОВ², В. А. ГОЛЬДАДЕ^{3,4+}

¹ООО «Молдер», Скидельское шоссе, 18-1, 230003, г. Гродно, Беларусь

²Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Беларусь

³Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь

⁴Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, ул. Советская, 104, 246019, г. Гомель, Беларусь

Рассмотрены предпосылки формирования особого энергетического состояния компонентов полимерных композитов, обеспечивающего достижение повышенных деформационно-прочностных, триботехнических и адгезионных характеристик композиционных материалов и изделий на основе полимерных, олигомерных и смесевых матриц. Предложен принцип энергетического и технологического соответствия компонентов, под которым понимается возможность достижения совокупного энергетического состояния, которое соответствует энергии активации преобладающего физико-химического процесса, обеспечивающего формирование оптимальной структуры межфазного слоя в композитах. Рассмотрены практические направления реализации энергетического подхода при разработке наноконпозиционных полимерных материалов, нашедших применение в промышленности.

Ключевые слова: компонент, композиционный материал, структура, энергия активации, наносостояние, энергетическое состояние.

ENERGY FACTOR IN TECHNOLOGY OF POLYMERIC COMPOSITES

S. V. AVDEYCHIK^{1,2}, V. A. STRUK², A. S. ANTONOV², V. A. GOLDADE^{3,4+}

¹LLC Molder, Skidelskoe shosse, 18-1, 230003, Grodno, Belarus

²Yanka Kupala State University of Grodno, Ozheshko St., 22, 230023, Grodno, Belarus

³V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus

⁴Francisk Skorina Gomel State University, Sovetskaya St., 104, 246019, Gomel, Belarus

The prerequisites for the formation of a special energy state of the components, increasing the parameters of deformation-strength, tribotechnical and adhesive characteristics of products from composite materials based on polymer, oligomeric and mixed matrices, are considered. The principle of energy and technological correspondence of components is proposed, which is understood as the possibility of achieving an overall energy state, which corresponds to the activation energy of the prevailing physicochemical process, which ensures the formation of the optimal structure of the interphase layer in composites. The practical implementation in the development of nanocomposite materials that have found application in industry are considered.

Keywords: component, composite material, structure, activation energy, nanostate, energy state.

Введение

Прорывным направлением развития функционального материаловедения является улучшение

показателей электрофизических, деформационно-прочностных, триботехнических, теплофизических, адгезионных и защитных характеристик композитов при введении в матрицы наноразмерных ком-

+ Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: victor.goldade@gmail.com

понентов различного состава, строения и технологии получения.

Несмотря на существенные успехи, достигнутые в теории нанокompозитов, существуют значительные трудности в их промышленном производстве, обусловленные отсутствием единых методологических подходов к технологии наноматериалов, методов их получения и переработки.

В номенклатуре машиностроительных материалов особое место принадлежит нанокompозитам на основе полимерных, олигомерных и совмещенных матриц, которые являются необходимыми в производстве современной техники [1–5].

Отдельные аспекты структурно-морфологических, энергетических и электрофизических характеристик нанокompонентов рассмотрены в исследованиях отечественных и зарубежных научных школ [1, 4–8]. Однако трансформирование феноменологических моделей, описывающих особое энергетическое состояние дисперсных частиц — наносостояние, в технологи функциональных нанокompозитов на основе полимеров крупнотоннажного производства возможно только при реализации системного подхода.

Цель работы — анализ предпосылок возникновения в материальных объектах наносостояния и выявление роли энергетического фактора в создании нанокompозитов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

1 Межфазное взаимодействие в полимерных композитах

Все виды межфазных процессов при контактном взаимодействии компонентов материалов обусловлены переносом энергии с образованием устойчивого термодинамически выгодного равновесного состояния. Многокомпонентные материалы на основе полимеров представляют собой системы, параметры которых зависят от интенсивности межфазных взаимодействий, приводящих к формированию граничных слоев [9–14]. Для композиционных материалов параметры граничного слоя определяют эксплуатационные характеристики изделий из них [4, 9–16].

Для обеспечения заданных параметров процессов межфазного взаимодействия при формировании граничного слоя необходимо *установление определяющей реакции* в зоне контакта и термодинамических условий ее протекания с заданной скоростью. Такая превалирующая реакция определяет устойчивость материала к воздействию технологических или эксплуатационных факторов [4, 6–10, 13]. Недостаточная интенсивность определяющего физико-химического процесса не позволяет обеспечить условия для формирования граничного слоя оптимального состава и строения, что может привести к механическому или тепловому разрушению материала.

Механизм и кинетику физико-химических реакций, протекающих с переносом (обменом) энергии, определяют энергетические процессы. Для стабильного и направленного протекания определяющего

физико-химического процесса в межфазном взаимодействии необходимо достижение совокупной энергии, равной значению энергии активации.

Важнейшим параметром формирования композитов, определяющим условия достижения их оптимальной структуры, является энергетическое состояние компонентов [9–14].

2 Энергетическое состояние компонентов

Для характеристики энергетического состояния компонентов будем использовать комплексный параметр [9, 12]. Анализ энергетического состояния компонентов [4, 5, 12] позволил установить связь параметров в его формировании (рис. 1).

Параметры энергетического состояния компонентов зависят от дисперсности и морфологии их поверхностного слоя.

Установлен факт изменения энергетического состояния частиц при увеличении степени дисперсности [17–22]. Это состояние характеризуют как *наносостояние*.

3 Условия и механизмы проявления наносостояния конденсированных сред

Несмотря на большое число публикаций, посвященных феномену наносостояния [1, 18–25], однозначного определения в материаловедении не существует. На наш взгляд, наиболее корректным является определение, предложенное П. фон Веймарном: «... между миром молекул (атомов, ионов) и микроскопически видимых частиц существует особая форма вещества ... — это ультрадисперсное или коллоидное состояние, образующееся при степени дисперсности (раздробленности) в котором пленки имеют толщину, а волокна и частицы — размер в поперечнике в диапазоне $1 \div 100$ нм» [17].

В данном определении ключевым фактором, обуславливающим реализацию наносостояния, является размер частицы вещества.

В более поздних работах коллоидное состояние вещества стали называть наноструктурированным состоянием, так как оно включает «структурные единицы с размерами в диапазоне $1 \div 100$ нм [18–20, 22, 23]. Вместе с тем, в работе [23] отмечено, что «...границы области размеров в нанометрах не могут быть корректными критериями наноструктурированного состояния вещества...». Очевидна необходимость разработки физического подхода к обоснованию размерного диапазона материальных объектов для их отнесения к наночастицам, то есть частицам с «особой формой вещества» [17], так как размеры в диапазоне $1 \div 100$ нм не могут *a-priori* характеризовать наносостояние частиц различного состава, строения и технологии получения [26].

Из экспериментальных данных следует, что материальная частица при достижении размеров, меньших некоторой критической величины L_0 ,



Рисунок 1 — Функциональная связь параметров компонентов с энергетическим состоянием полимерных композитов
 Fig. 1 — Functional relationship of the parameters of components with the energy state of polymer composites

характеризуется особыми параметрами физических свойств [1–4, 17–26]. Для определения L_0 необходимо учесть влияние относительно большого количества атомов с нескомпенсированными связями, находящихся в поверхностном слое наночастицы. Если длина волны плазмона (фонона) соизмерима с размерами наночастицы, то её свойства становятся отличными от макрочастиц такого же состава. При этом, на наш взгляд, уместна аналогия с описанием свойств кристаллических веществ, согласно которой существует определённое значение температуры, выше которой для анализа используют классические представления, а ниже этой температуры — квантовые [27]. Эту температуру называют температурой Дебая (θ_D) и определяют из выражения $E_D = k\theta_D$; здесь $E_D = \hbar\omega_D$ — дебаевская энергия, где ω_D — максимальная частота колебаний кристаллической решетки.

Процессы, протекающие в веществах, обычно разделяют на два типа: электронные и фоновые. К электронным процессам относят те, в которых фигурируют электромагнитные взаимодействия. К фоновым относят диффузию, тепловые колебания атомов, распространение волн механических возбудителей (например, акустических).

Наибольший интерес вызывает параметр λ_D — дебаевская длина. Для электронов параметр λ_D определяет размер участка в частице вещества, на который распространяется влияние отдельного электрона. При $r > \lambda_D$ справедливо одноэлектронное

адиабатическое приближение, при $r < \lambda_D$ необходимо использовать модель электронной жидкости (электронного газа).

Дебаевская длина является важным параметром фоновых процессов, так как параметр λ_D — это средняя длина свободного пробега фонона. При условии $r < \lambda_D$ частица характеризуется состоянием своеобразного «фононного вакуума», и физические процессы, происходящие в ней, отличаются от процессов, протекающих в объемном образце.

При достижении размерного параметра L_0 материальная частица приобретает особое энергетическое состояние — наносостояние, которое изменяет механизмы и кинетику межфазных процессов. Анализ литературных источников и наши исследования [1, 4, 18–24], позволили установить *основные факторы, определяющие наносостояние*.

Размерный критерий L_0 будет зависеть от состава и структуры исходных полуфабрикатов, технологии получения дисперсных частиц и вида межфазных взаимодействий. Например, в зависимости от элементного состава и степени дефектности используемого полуфабриката возможно формирование энергетического состояния с большим временем релаксации (*электретов*) [28]. Частицы природных электретов (например, кремния, шунгитов, глин и др.) обладают повышенной активностью в межфазных взаимодействиях, обусловленной особенностями их строения [29]. Характерная кристаллическая структура слоистых кремний- и углеродсодержащих минералов (графита, слюды, глин, талька) является

предпосылкой формирования наносостояния в результате наличия межслоевых частиц (делокализованных ионов Na^+ , K^+) и разрушения слабых межслоевых физических связей при механическом, термическом или другом энергетическом воздействии, вызывающем расщепление частицы и образование ювенильных поверхностей, приводящее к образованию зарядовой мозаики [29]. Эта мозаика, как показано в [30], формирует энергетические параметры поверхностного слоя частиц, достаточные для протекания межфазных реакций [1, 2, 4, 12, 14]. Например, при формировании металлополимерных адгезионных соединений установлен так называемый эффект «растворения металлической подложки» [31], который обеспечивает повышенную прочность адгезионной связи. Аналогичный эффект зафиксирован и в металлополимерных парах трения при их эксплуатации без смазки [16].

Исходный элементный состав компонентов при различных размерах частиц способен как катализировать, так и ингибировать межфазные реакции, определяя состав и структуру граничного слоя и эксплуатационные свойства композита [12].

4 Поверхностный слой как фактор проявления наносостояния

Существенное значение в механизме проявления наносостояния играет морфология поверхностного слоя компонентов системы.

Анализ строения поверхностного слоя дисперсных частиц различного состава с использованием АСМ и РЭМ свидетельствует о наличии ультрадисперсных компонентов различной формы (пластинчатой, глобулярной, нитевидной), которые имеют размеры в сечении, характерные для наносостояния согласно [1, 17–21, 24]. Поэтому на кинетику физико-химических реакций в межфазной области влияет энергетическое состояние компонентов и морфология поверхностного слоя дисперсной частицы и полимерной матрицы. Морфология поверхностного слоя зависит не только от технологии получения или обработки компонентов, но и от типа их кристаллической или надмолекулярной структуры.

Особое значение эта морфология имеет при трении. Из классических представлений [15, 32] следует, что механизмы трения и изнашивания во многом определяются кинетикой реакций в зоне контакта, результатом которых является так называемое «третье тело», содержащее наноконтакты.

Интенсивность трибохимических реакций зависит не только от состава контактирующих материалов, но и от их активности в процессах термоокислительной деструкции, трибокрекинга, образования металлсодержащих соединений и адсорбционного взаимодействия [4, 12]. Очевидно, что нахождение компонентов трибосистемы в наносостоянии многократно интенсифицирует межфазные взаимодействия, обуславливая, в ряде случаев, формирование разделительного слоя со свойствами ингибитора изнашивания [12]. Характерными проявлениями наносостояния

компонентов трибосистем являются наличие трибоэлектретов [33], образование высокодисперсных продуктов изнашивания, наноразмерные параметры микронеровностей, образование радикальных продуктов и металлсодержащих соединений, продуктов нестехиометрического состава (бертоллидов) [1–5, 34–36] и др.

Проявление наносостояния компонентов материалов различного состава и строения определяется не только их исходными параметрами, но и особенностями взаимодействия на стадиях подготовки, активации, совмещения, переработки композиций и эксплуатации изделий при заданных нагрузочно-скоростных и температурных режимах.

При различных видах контактирования компонентов и воздействия технологических факторов возможно проявление наносостояния, обусловленное увеличением суммарной энергии частиц или их отдельных участков вследствие протекания процессов диспергирования, электризации, деструкции, трибокрекинга, сополимеризации и др. В результате дисперсные частицы микронного и миллиметрового диапазона, а также контактные поверхности основы приобретают способность к межфазному взаимодействию с образованием продуктов реакций, протекание которых невозможно с точки зрения классических представлений [23].

Экспериментально установлено и теоретически обосновано образование продуктов механохимических реакций при совмещении твердофазных компонентов различного состава, строения и дисперсности, в том числе металлических порошков, полимерных порошков и частиц модификаторов, смесей полимерных порошков и т. п. [5, 34–36]. Существование так называемых бертоллидов, имеющих переменный состав, позволяет не только совместить компоненты, несовместимые в обычных условиях, но и реализовать синергический эффект улучшения их характеристик вследствие образования наноразмерных фаз в объеме матричного связующего или в зоне фрикционного контакта [2, 4, 5, 12, 34, 35].

Проведенный анализ литературных данных и собственные исследования позволили выделить основные факторы, влияющие на наносостояние компонентов материалов (рис. 2).

5 Принцип энергетического и технологического соответствия

Системный анализ факторов, указанных на рис. 2, позволяет установить энергетическое и технологическое соответствие компонентов композитных материалов. Под *энергетическим соответствием* компонентов мы понимаем возможность достижения ими совокупного энергетического состояния, которое соответствует энергии активации превалирующего физико-химического процесса.

Для реализации принципа *энергетического соответствия* компонентов необходимо не только определенное сочетание исходных параметров, но и возможность их изменения в заданных диапазонах



Рисунок 2 — Факторы наносостояния компонентов материальных систем
Fig. 2 — Factors of nanostate of components of material systems

значений при технологических воздействиях на компоненты композитов. При выборе технологии получения, совмещения компонентов или переработки композитов в изделия создаются условия для достижения наносостояния в зоне межфазного взаимодействия, которое обеспечивает протекание преобладающего процесса формирования оптимальной структуры граничного слоя. Формирование такого слоя указывает на технологическое соответствие компонентов функциональных материалов. Реализация принципа энергетического и технологического соответствия позволяет разработать практические приёмы использования феномена наносостояния в материаловедении полимерных композитов.

Предложенный принцип энергетического и технологического соответствия может быть реализован в различных вариантах. Характерным примером его реализации является разработка составов и технологии композиционных материалов на основе ПТФЭ. Для обеспечения энергетического соответствия матричного полимера и многофункционального модификатора в виде дисперсных фрагментов углеродного волокна использовали технологии механохимического совмещения в различных вариантах: механохимическая активация компонентов (МА), всестороннее сжатие (ВС), холодная монолитизация (ХМ) или их сочетание (МА + ВС), (ВС + ХМ). Во всех этих случаях удаётся интенсифицировать межфазное взаимодействие матрицы и наполнителя вследствие хемосорбционных процессов, инициированных образованием макромолекулярных фрагментов с повышенной энергетической активностью [5]. Это позволило су-

щественно повысить параметры деформационно-прочностных и триботехнических характеристик разработанных составов при увеличении степени наполнения углеродсодержащими компонентами от 10–15 мас.% до 30–35 мас.%, что обеспечило повышение нагрузочно-скоростных параметров изделий [4, 5].

Эффективным направлением механохимического совмещения является использование углеродных модификаторов, активированных короткоимпульсным лазерным излучением (ЛИ). ЛИ формирует наноразмерный рельеф в поверхностном слое частицы, способствующий увеличению адсорбционной составляющей адгезионного взаимодействия на границе раздела «матрица–наполнитель» и повышению деформационно-прочностных характеристик наноконкомпозитов по сравнению с составами, содержащими исходные модификаторы [37].

Другим направлением реализации принципа энергетического и технологического соответствия является использование силикатсодержащих модификаторов слоистого строения при обеспечении процесса перехода их в наносостояние в среде расплава матричного полимера. Наши исследования и литературные источники указывают на возможность протекания процесса эксфолирования (проникновения) макромолекул связующего в систему наночастиц пластинчатой формы при технологической обработке смеси компонентов [8, 29]. Эффект эксфолирования усиливается при предварительном модифицировании частиц низкомолекулярными компонентами, которые интенсифицируют

процесс расслоения исходных частиц по плоскостям спайности [39]. В результате формируется структура нано-композита, в которой макромолекулы матричного полимера образуют пространственную сетку физических адсорбционных связей с активными наночастицами, которая обеспечивает значительное улучшение характеристик изделий [29].

Синергический эффект повышения деформационно-прочностных и триботехнических характеристик, а также стойкости к термоокислительной деструкции реализуется при формировании металлополимерных наноструктур на основе термопластов путем термометаллизации металлосодержащих солей поливалентных металлов (Cu, Zn, Fe и др.) в полимерной матрице, находящейся в вязко-текучем состоянии. Экспериментально установлено, что модифицирование полиамидных матриц (ПА 6, ПА 66, ПА 11) наноразмерными частицами металлов (Cu, Zn, Pb и др.) или их оксидов с содержанием $0,001 \div 0,05$ мас.% приводит к трансформированию термоокислительных процессов, характерных для композиций с частицами в размерном диапазоне 10–120 мкм, в процессы, позиционируемые как «цепная стабилизация». Вследствие этого не только существенно увеличиваются параметры деформационно-прочностных характеристик нанокомпозитов, но и их устойчивость к воздействию термоокислительных сред. Например, прочность при растяжении полиамида ПА 6 после 100 чв окисления при 150 °С имеет значение 25–30 МПа, а у нанокомпозита с содержанием наночастиц меди $0,01 \div 0,05$ мас.% — не менее 40 МПа после 1000 ч эксплуатации в термоокислительной среде.

Разработаны технологии получения металлополимерных нанокомпозитов на основе термопластичных матриц. Например, диффузионная технология модифицирования полимерного полуфабриката в виде порошков или гранул металлосодержащим прекурсором позволяет в процессе переработки сформировать структуру наноматериала, в которой наночастицы металла, образующие адсорбционные физические связи с активными центрами макромолекул, выполняют функцию армирующего компонента и нецепного антиоксиданта с пролонгированным действием, ингибирующего неблагоприятные трибохимические процессы. Характерным подтверждением роли наносостояния компонентов является установленный эффект выполнения наноразмерными углеродсодержащими частицами (коллоидно-графитового препарата, термически расщепленного графита, УНТ) функции антиоксиданта нецепного механизма действия в композитах на основе полиамидных и смесевых матриц [37] при сохранении ими традиционного действия триботехнического модификатора. Дисперсные частицы микронного размера при одинаковом содержании в составе композита не обеспечивают достижение отмеченного синергического эффекта.

Повышение энергетических параметров макромолекул, которое способствует увеличению ин-

тенсивности межфазных взаимодействий в смесевых композитах на основе компонентов с различной термодинамической совместимостью, обеспечивается введением жидкофазного пластификатора в сочетании с различными наноразмерными частицами, которые выполняют функцию физического компатибилизатора [37].

Проведенный системный анализ литературных источников [3, 4, 9, 10, 16–25] и наши исследования [5, 29, 37] позволили классифицировать «наносостояние» как *особую форму существования частиц* материала, характеризующуюся их активностью в процессах межфазного взаимодействия и обусловленную наличием нескомпенсированных и делокализованных носителей заряда различной природы. Их подвижность и локализация проявляются под действием внешних факторов в некотором размерном диапазоне, индивидуальном для каждого типа вещества. Предложенное определение «наносостояние», на наш взгляд, позволяет объединить виды межфазных взаимодействий компонентов материала различного состава, строения и функционального назначения энергетическим фактором.

Очевидно, что материалы различаются по исходному энергетическому состоянию. В веществах одного типа существуют исходные компоненты, которые сами находятся в наносостоянии или создают предпосылки для его возникновения при направленных технологических воздействиях. Например, в природных материалах типа шунгита, кремня, угля и др. существуют наночастицы (фуллерены, природные нанотрубки) или локализованные фазы наноразмерного диапазона с повышенным количеством носителей заряда в виде ионов или дефектов структуры (дислокаций, примесных атомов, пор и т. п.) [29]. Такие вещества проявляют характерные признаки наносостояния при достаточном содержании наноразмерных объектов различной структуры и строения. Например, наличие фуллеренов и других составляющих в шунгитах и кремнях обеспечивает выраженный бактерицидный эффект при фильтровании водных сред, подобный по эффективности действия эффекту влияния электростатического состояния в фильтровальных материалах на основе полиолефинов [7]. Вещества другого типа способны переходить в наносостояние при определенных видах технологических воздействий — дроблении, многократном механическом передеформировании, легировании, трении, ионной имплантации и т. п. [12, 13, 18–20]. При этом для некоторых веществ характерны структурные предпосылки, которые способствуют проявлению наносостояния без диспергирования полуфабриката до частиц размерного диапазона $1 \div 100$ нм. К таким предпосылкам относятся наличие межслоевых ионов в геосиликатах, полиморфизм матричного элемента сплава, наличие проходных макромолекул в надмолекулярных структурах, низкий уровень межмолекулярного взаимодействия в полимерных матрицах и т. п.

В предложенном определении термина «наносо-

стояние» ключевым признаком является размер частицы или компонента морфологии поверхностного слоя, который определяет вклад каждого из факторов, представленных на рис. 2, и является индивидуальной характеристикой материальных субстанций.

6 Апробирование разработанных методологических подходов

Проведенный анализ предпосылок формирования наносостояния компонентов материалов на основе высокомолекулярных матриц позволил разработать направления их практической реализации. Разработаны методологические принципы получения нанокпозиционных материалов на основе промышленных термопластов, включающие:

- выбор природных и синтетических углеродсодержащих, металлсодержащих и кремнийсодержащих полуфабрикатов для формирования активных наноразмерных частиц с заданными структурно-морфологическими и энергетическими параметрами при оптимальных режимах технологического воздействия (механического, механохимического, термического, лазерного);

- реализацию условий энергетического и технологического соответствия наномодификаторов преобладающему механизму формирования оптимальной структуры полимерных, олигомерных и смещенных матриц на различных уровнях организации – молекулярном, надмолекулярном и межфазном;

- обеспечение условий проявления предпочтительных механизмов межфазных физико-химических взаимодействий компонентов с образованием граничных слоев оптимального строения.

Методологические подходы по оценке роли наносостояния модификаторов использованы при создании новых полимерных композитов.

Для изготовления уплотнительных, защитных и демпфирующих элементов автомобильных агрегатов (тормозных камер, автомобильных амортизаторов, карданных валов) разработаны составы нанокпозиционных материалов на основе термоэластопластов (СЭВА, ТПУ), модифицированных термопластичными компонентами (ПЭНД, СФД) в сочетании с наноразмерными частицами силикатсодержащих минералов слоистой, каркасной или цепочечной структуры, полученных термической обработкой дисперсных полуфабрикатов [38–42]. Введение в состав матрицы силикатных НРЧ обеспечивает формирование переходных слоев на границе раздела «термоэластопласт–термопласт» по механизму адсорбционного взаимодействия макромолекул матричного связующего и модифицирующего компонента с активными центрами дисперсной частицы, которая выполняет функцию физического компатибилизатора.

Другим вариантом исполнения нанокпозиционного материала на основе полиолефинов (ПП, ПЭНД, ПЭВД) является использование механоактивированных частиц природных силикатов [43, 44], которые обладают повышенной активностью в про-

цессах адсорбционного взаимодействия с макромолекулой. Действие нескомпенсированного заряда у частиц модификатора обуславливает ориентационные процессы в расплаве композита с образованием упорядоченных (квазикристаллических) структур, играющих роль армирующих нанообластей. Дополнительный эффект упрочнения и повышения абразивостойкости композитов достигается при ориентационной одноосной вытяжке полуфабриката в виде стренги с последующим введением армирующих элементов в базовую матрицу (ПП, ПЭВД, ПЭНД) [45, 46]. Использование силикатных НРЧ для модифицирования полиолефинов позволяет регулировать в широком диапазоне параметры реологических и деформационно-прочностных характеристик.

Для повышения эксплуатационного ресурса тяжело нагруженных узлов трения автомобильных агрегатов и технологической оснастки (карданных валов, токарных патронов) разработаны составы и технология нанокпозиционных материалов на основе полиамидов. Модифицированием полиамидной матрицы (ПА 6, ПА 11) наноразмерными частицами силикатных минералов (слюд, монтмориллонита, каолина, трепела) или углеродсодержащими частицами (УДАГ, УНТ, графит) достигнуты необходимые адгезионные характеристики покрытий при существенном увеличении их износостойкости при эксплуатации без подвода внешней смазки. Разработанные триботехнические составы [39, 41, 42, 57] являются эффективной альтернативой составам на основе импортного аналога ПА 11 (*Rilsan*).

Металлополимерные нанокпозиционные покрытия на основе полимерных связующих, полученные при воздействии теплового газового потока на смесь термопластичного полимера (ПА 6, ПЭТ, ПЭНД) и металлсодержащего прекурсора (формиаты, оксалаты, карбонилы Cu, Zn, Ni, Fe), отличаются повышенной износостойкостью, адгезионной прочностью и стойкостью к воздействию термоокислительных сред [41, 48].

Исследования структуры и модифицирующего действия наноразмерных объектов в высокомолекулярных матрицах позволили разработать методологические подходы, обеспечивающие получение высокопрочных износостойких нанокпозиционных материалов на основе ПТФЭ с повышенным содержанием (до 25–35 мас.%) функциональных наполнителей — углеродсодержащих компонентов, таких как шунгит, УВ, графит [5].

Активность дисперсных частиц, подвергнутых энергетическим воздействиям, обусловленная как изменением морфологии поверхностного слоя, содержащего наноккомпоненты, так и наличием нескомпенсированного заряда с большим временем релаксации, послужила основанием для разработки эффективных составов смазочных масел и пластичных смазок для тяжело нагруженных узлов трения на основе промышленных продуктов (МС-20, И-5, ЦИАТИМ-201, Литол-24, Итмол) [49–50]. При введении высокодисперсных частиц, активированных

термическим, лазерным или механохимическим воздействием, в смазочном составе формируются зарядовые кластеры, способствующие повышению нагрузочной способности узла трения. Разработаны составы смазочных масел, гидравлических жидкостей и пластичных смазок для применения в конструкциях автокомпонентов (тормозных камер, карданных валов) и токарных патронов для металлообрабатывающего оборудования.

Промышленная апробация предложенных подходов к использованию феномена наносостояния в технологии композитных материалов на основе высокомолекулярных матриц подтвердила их обоснованность и эффективность.

Выводы

На основе системного подхода к исследованию влияния структуры и энергетического состояния наноразмерных частиц конденсированных сред рассмотрены механизмы физико-химических процессов, происходящих в композиционных материалах с полимерной матрицей, определяющие параметры их структуры на молекулярном, надмолекулярном и межфазном уровнях. Разработаны методологические подходы к созданию наноконпозиционных материалов на основе промышленных термопластов с повышенными параметрами деформационно-прочностных, триботехнических, адгезионных и защитных характеристик. Предложенный вариант определения наносостояния как особой формы существования частиц материала позволяет объединить различные виды межфазных взаимодействий компонентов энергетическим фактором, определяющим значение энергии активации преобладающего физико-химического процесса.

Предложен принцип энергетического и технологического соответствия компонентов, под которым понимается возможность достижения совокупного энергетического состояния, обеспечивающего формирование оптимальной структуры межфазного слоя в полимерных композитах.

Рассмотрены практические направления реализации наносостояния при разработке промышленных наноконпозиционных материалов на основе высокомолекулярных матриц.

Перспективы дальнейших научных исследований заключаются в расширении диапазона применения принципа энергетического и технологического соответствия компонентов, в частности, при создании и изучении наноконпозиционных материалов на основе новых полимерных связующих (полилактиды, полипиррол, полиацетилен, поливинилпирролидон и др.) и наполнителей (повиаргол, гидроксипатит, монтмориллонит и др.). Это позволит зарождающейся отечественной nanoиндустрии обеспечить высокоэффективными материалами нового поколения промышленное производство не только в области машиностроения, теплоэнергетики и строительной индустрии, но и в таких наукоемких областях как медицина и электроника.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Т18М-139) и Государственного комитета по науке и технологиям в рамках договоров № Т19УЗБГ-003 и № Т20ПТИ-005.

Обозначения

АСМ — атомно-силовая микроскопия; ДСТ — дивинилстирольный термоэластопласт; ЛИ — лазерное излучение; НРЧ — наноразмерные частицы; ПА — полиамид; ПП — полипропилен; ПТФЭ — политетрафторэтилен; ПЭ — полиэтилен; ПЭВД — полиэтилен высокого давления; ПЭНД — полиэтилен низкого давления; ПЭТ — полиэтилентерефталат; РЭМ — растровая электронная микроскопия; СФД — сополимер формальдегида с диоксолоном; СЭВА — сополимер этилена с винилацетатом; ТПУ — термопластичный полиуретан; УДАГ — ультрадисперсный алмазографитовый порошок; УНТ — углеродная нанотрубка; E_D , Дж — дебаевская энергия; h — постоянная Планка; k — постоянная Больцмана; L_0 , и r , нм — размер частицы; θ_D , К — температура Дебая; λ_D , м — дебаевская длина; ω_D , Гц — максимальная частота колебаний кристаллической решетки.

Литература

1. Елисеев А. А., Лукашин А. В. Функциональные наноматериалы / под ред. Ю. Д. Третьякова. М.: Физматлит, 2010. 456 с.
2. Авдейчик С. В., Афонин А. Н., Воропаев В. В., Иванов В. П., Киричек А. В., Лиопо В. А., Михайлова Л. В., Морозова А. В., Овчинников Е. В., Рыскулов А. А., Скаскевич А. А., Струк В. А., Эйсымонт Е. И. Прогрессивные машиностроительные технологии: монография: т. II. / под ред. А. В. Киричека. М.: Спектр, 2012. 336 с.
3. Наноструктурные материалы—2008: Беларусь—Россия—Украина (НАНО—2008): материалы Первой международной научной конференции, Минск, 22—25 апреля 2008 г. / редкол.: П. А. Витязь (председатель) [и др.]. Минск: Беларуская навука, 2008. 765 с.
4. Охлопова А. А. Физико-химические принципы создания триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена и ультрадисперсных керамик: дис. д-ра техн. наук: 05.02.01; 05.02.04. Якутск, 2000. 269 с.
5. Авдейчик С. В., Воропаев В. В., Скаскевич А. А., Струк В. А. Машиностроительные фторкомпозиты: структура, технология, применение / под ред. В. А. Струка. Гродно: ГрГУ, 2012. 339 с.
6. Рогачев А. А. Функциональные наноразмерные композиционные покрытия на основе продуктов электронно-лучевого диспергирования полимеров: дис. д-ра техн. наук: 05.16.08. Минск, 2016. 278 с.
7. Кравцов А. Г. Электрические и магнитные поля в полимерных волокнистых фильтроэлементах для тонкой очистки многофазных сред: дис. д-ра техн. наук: 01.04.07. Гомель, 2007. 321 с.
8. Песецкий С. С., Богданович С. П., Мышкин Н. К. Наноконпозиции, получаемые диспергированием слоистых силикатов в расплавах полимеров (обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2015. Т. 1, № 1. С. 7–37.
9. Джейкок М., Парфит Дж. Химия поверхностей раздела фаз: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 269 с.
10. Липатов Ю. С. Физико-химические основы наполнения полимеров. М.: Химия, 1991. 260 с.
11. Ролдугин В. И. Самоорганизация наночастиц на межфазных

- поверхностях // Успехи химии. 2004. Т. 73, № 2. С. 123–156.
12. Гольдаде В. А., Струк В. А., Песецкий С. С. Ингибиторы изнашивания металлополимерных систем. М.: Химия, 1993. 240 с.
 13. Хайнике Г. Трибохимия: пер. с англ. М.: Мир, 1987. 584 с.
 14. Белый В. А., Егоренков Н. И., Плескачевский Ю. М. Адгезия полимеров к металлам. Минск: Наука и техника, 1976. 228 с.
 15. Крагельский И. В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
 16. Плескачевский Ю. М. О некоторых аналогиях фрикционного динамического и адгезионного статического контактирования металла с термопластичным полимером // Трение и износ. 1983. Т. 4, № 5. С. 948–951.
 17. Веймарн П. П. К учению о состоянии материи (основания кристаллизационной теории необратимых процессов). СПб, 1910. 188 с.
 18. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. 2-е изд., испр. М.: Физматлит, 2007. 416 с.
 19. Ajayan P. M., Schadler L. S., Braun A. V. Nanocomposite science and technology. NY: Wiley, 2004. 230 p.
 20. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии: пер. с англ. М.: Техносфера, 2005. 334 с.
 21. Киреев В. Нанотехнологии: история возникновения и развития // Наноиндустрия. 2008. № 2. С. 2–10.
 22. Витязь П. А., Свидинович Н. А., Куис Д. В. Наноматериаловедение. Минск: Вышэйшая школа, 2015. 511 с.
 23. Бучаченко А. Л. Нанохимия – прямой путь к высоким технологиям нового века // Успехи химии. 2003. Т. 72, № 5. С. 419–437.
 24. Киреев В. Ю., Врублевский Э. М., Недзвецкий В. С., Сосновцев В. В. Философские, физические и химические аспекты объектов и методов нанотехнологий // Информация и инновации. 2010. Спец. вып. С. 2–90.
 25. Вигдорович В. И., Цыганкова Л. Е., Осетров А. Ю. Наносостояние вещества как основа реакционной способности наноматериалов // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2011. Т. 47, № 3. С. 330–336.
 26. Лиопо В. А. Размерная граница между нано- и объемным состоянием: теория и эксперимент // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2: Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. 2007. № 2. С. 65–71.
 27. Эпштейн Э. М. Дебая теория // Физическая энциклопедия / гл. ред. А. М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1988. Т. 1. С. 573–574.
 28. Гольдаде В. А., Зотов С. В., Шаповалов В. М., Юдин В. Е. Электронный эффект в полимерных наноккомпозитах (Обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2019. Т. 5, № 2. С. 6–18.
 29. Авдейчик С. В., Лиопо В. А., Струк В. А., Прушак В. Я., Щерба В. Я. Полимер-силикатные машиностроительные материалы: физико-химия, технология, применение / под ред. В. А. Струка, В. А. Щербы. Минск: Тэхналогія, 2007. 431 с.
 30. Дистлер Г. И., Власов В. П., Герасимов Ю. М., Кобзарева С. А., Кортюкова Е. И., Лебедева В. И., Москвин В. В., Шенявская Л. А. Декорирование поверхности твердых тел. М.: Наука, 1976. 112 с.
 31. Белый В. А., Егоренков Н. И., Плескачевский Ю. М. Явление растворения металлов расплавами полимерных покрытий // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. 1970. Т. 12, № 9. С. 643–644.
 32. Гаркунов, Д. Н. Триботехника. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
 33. Mironov V. S. Triboelectret state of polymer composites // Proceedings of the 7th International Symposium on Electrets (ISE-7). Berlin, 1991, pp. 310–315.
 34. Аввакумов Е. Г. Механические методы активации химических процессов. Новосибирск: Наука, 1979. 259 с.
 35. Григорьева Т. Ф., Барина А. П., Ляхов Н. З. Механохимический синтез в металлических системах / отв. ред. Е. Г. Аввакумов. Новосибирск: ИХТТМ СО РАН, 2008. 311 с.
 36. Хинт И. А. УДА-технология: проблемы и перспективы. Таллин: Валгус, 1981. 36 с.
 37. Авдейчик С. В., Струк В. А., Сорокин В. Г., Антонов А. С. Особенности реализации наноразмерности в композитах на основе полимерной матрицы // Наноматериалы и наноструктуры – XXI век. 2016. Т. 7, № 2. С. 37–44.
 38. Патент 16768 РБ, МПК C08L 27/18, C08K 3/04, C08K 3/10. Композиционный триботехнический материал / О. В. Авдейчик, В. А. Струк, М. В. Ищенко, Р. В. Ищенко, А. С. Прушак, А. В. Конопляник, В. В. Барсуков; заявитель и патентообладатель ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством». № а 20110768; заявл. 03.06.2011; опубл. 28.02.2013, Бюл. № 1. С. 88.
 39. Патент 2268273 РФ, МПК C08J 5/16, C10M 171/06, C10M 107/38. Композиционный термостойкий триботехнический материал / В. А. Струк, В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, С. В. Авдейчик; заявитель и патентообладатель ОАО «Белкард». № 2004126475/04; заявл. 31.08.2004; опубл. 20.01.2006, Бюл. № 2.
 40. Патент 2276677 РФ, МПК C08L 23/12, C08K 9/00. Композиционный термопластичный материал / В. А. Струк, В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, С. В. Авдейчик, С. В. Ратобильский, А. Ф. Мануленко, О. С. Смурага; заявитель и патентообладатель ОАО «Белкард», ООО «Техполимер». № 2004123043/04; заявл. 27.07.2004; опубл. 20.05.2006, Бюл. № 14.
 41. Патент 2338764 РФ, МПК C09D 5/03, C09D 177/02. Состав композиционного полимерного материала для функционального покрытия и способ его нанесения / В. А. Струк, В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, С. В. Авдейчик, Е. В. Овчинников, В. Л. Басинюк, И. И. Герасимчик, И. А. Шкурский, Е. И. Мардосевич; заявитель и патентообладатель ОАО «Белкард». № 2006129951/04; заявл. 18.08.2006; опубл. 20.11.2008, Бюл. № 32.
 42. Патент 2321603 РФ, МПК C08J 3/12, B29B 9/00. Способ изготовления изделий из полимерных термопластичных материалов / В. А. Струк, В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, С. В. Авдейчик, Л. С. Белый, Е. В. Овчинников, В. А. Лиопо; заявитель и патентообладатель ОАО «Белкард». № 2006122775/12; заявл. 26.06.2006; опубл. 10.04.2008, Бюл. № 10.
 43. Патент 2283325 РФ, МПК C08L 23/02. Композиционный термопластичный материал / В. А. Струк, В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, С. В. Авдейчик, А. А. Скаскевич, А. В. Чекель; заявитель и патентообладатель ОАО «Белкард», РУП «Белворполимер». № 2004123804/04; заявл. 03.08.2004; опубл. 10.09.2006, Бюл. № 25.
 44. Патент 2332525 РФ, МПК C23C 24/04, C09D 5/08, C09D 5/03, C08K 3/34, C09D 177/00, C09D 123/06, C09D 167/02. Способ формирования композиционного покрытия из силикатполимерного материала / В. А. Струк, В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, С. В. Авдейчик, Е. В. Овчинников, В. А. Лиопо, В. В. Клецко, М. А. Белоцерковский; заявитель и патентообладатель ОАО «Белкард». № 2006139866/04; заявл. 10.11.2006; опубл. 27.08.2008, Бюл. № 25.
 45. Патент 22316 РБ, МПК C08K 9/02, C08K 9/04, C08K 3/34. Способ получения наномодификатора для полимерных материалов / А. С. Антонов, В. А. Струк, С. В. Авдейчик, А. С. Воронцов; заявитель и патентообладатель ГрГУ им. Янки Купалы. № а 20160410; заявл. 14.11.2016; опубл. 30.12.2018, Бюл. № 6. С. 69.
 46. Патент 10901 РБ, МПК C09C 3/04, B28D 1/00. Способ получения низкоразмерных наполнителей для полимерных материалов / В. А. Струк, В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, С. В. Авдейчик, Е. В. Овчинников, В. А. Лиопо, В. В. Клецко, М. А. Белоцерковский; заявитель и патентообладатель ОАО «Белкард». № а 20061094; заявл. 03.11.2006; опубл. 30.08.2008.
 47. Патент 21061 РБ, МПК C08J 5/16, C09K 9/04. Способ получения триботехнического материала на основе полиамида / В. А. Струк, Е. В. Овчинников, Е. И. Эйсымонт, С. В. Авдейчик, В. Я. Щерба, А. П. Разумцев, Ю. В. Мишук; заявитель и патентообладатель ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством». № а 20140294; заявл. 23.05.2014; опубл. 30.06.2017, Бюл. № 3, С. 92–93.
 48. Патент 2332524 РФ, МПК C23C 24/04, C09D 5/10, C09D 177/00, C09D 123/06, C09D 167/02. Способ получения металлополимерного покрытия / В. А. Струк, В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, С. В. Авдейчик, Е. В. Овчинников, В. В. Клецко, П. И. Заяш; заявитель и патентообладатель ОАО «Белкард». № 2006139863/04; заявл. 10.11.2006; опубл. 27.08.2008, Бюл. № 24.
 49. Заявка а 20121815 РБ, МПК C10M 169/06. Пластичная смазка / В. А. Струк, С. В. Авдейчик, Е. В. Овчинников, Е. И. Эйсымонт, В. И. Кравченко; заявитель ГрГУ им. Янки Купалы. Заявл.

08.09.2014; опублик. 30.04.2016, Бюл. № 4, С. 23.

50. Патент 18073 РБ, МПК С10М 161/00. Состав композиционного смазочного материала / В. А. Струк, С. В. Авдейчик, Е. В. Овчинников, Г. А. Костиюкович, В. И. Кравченко; заявитель и патентообладатель ГрГУ им. Янки Купалы. № а 20120621; заявл. 16.04.2012; опублик. 30.04.2014, Бюл. № 2, С. 86.
- ## References
1. Yeliseyev A. A., Lukashin A. V. *Funktsional'nyye nanomaterialy* [Functional nanomaterials]. Ed. Yu. D. Tretyakov. Moscow : Fizmatlit Publ., 2010. 456 p.
 2. Avdeychik S. V., Afonin A. N., Voropaev V. V., Ivanov V. P., Kirichek A. V., Liopo V. A., Mikhaylova L. V., Morozova A. V., Ovchinnikov E. V., Ryskulov A. A., Skaskevich A. A., Struk V. A., Eysymont E. I. *Progressivnyye mashinostroitel'nye tekhnologii* [Progressive engineering technologies]. Moscow : Spektr Publ., 2012, vol. 2. 336 p.
 3. *Materialy Pervoy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Nanostrukturnyye materialy-2008: Belarus–Rossiya–Ukraina (NANO–2008)»* [Materials of the First Intern. scientific. conf. “Nanostructured Materials-2008: Belarus–Russia–Ukraine (NANO–2008)”]. Minsk : Belaruskaya Navuka Publ., 2008. 765 p.
 4. Okhlopko A. A. Fiziko-khimicheskiye printsipy sozdaniya tribotekhnicheskikh materialov na osnove politetraforetilena i ul'tradispersnykh keramik. Diss. dokt. tech. nauk [Physicochemical principles of creating tribological materials based on polytetrafluoroethylene and ultradispersed ceramics. Dr. eng. sci. diss.]. Yakutsk, 2000. 269 p.
 5. Avdeychik S. V., Voropayev V. V., Skaskevich A. A., Struk V. A. *Mashinostroitel'nyye ftorkompozity: struktura, tekhnologiya, primeneniye* [Machine-building fluorine composites: structure, technology, application]. Ed. V. A. Struk. Grodno : GrGU Publ., 2012. 339 p.
 6. Rogachev A. A. Funktsional'nyye nanorazmernyye kompozitsionnyye pokrytiya na osnove produktov elektronno-luchevogo dispergirvaniya polimerov. Diss. dokt. tech. nauk [Functional nanosized composite coatings based on the products of electron-beam dispersion of polymers. Dr. eng. sci. diss.]. Minsk, 2016. 278 p.
 7. Kravtsov A. G. Elektricheskiye i magnitnyye polya v polimernykh voloknistykh fil'troelementakh dlya tonkoy ochildki mnogofaznykh sred. Diss. dokt. tech. nauk [Electric and magnetic fields in polymeric fibrous filter elements for fine cleaning of multiphase media. Dr. eng. sci. diss.]. Gomel', 2007. 321 p.
 8. Pesetskiy S. S., Bogdanovich S. P., Myshkin N. K. Nanokompozity, poluchayemye dispergirvaniyem sloistykh silikatov v rasplavakh polimerov (obzor) [Nanocomposites obtained by dispersing layered silicates in polymer melts (review)]. *Polymer materials and technologies*, 2015, vol. 1, no. 1, pp. 7–37.
 9. Dzheykok M., Parfit Dzh. *Khimiya poverkhnostey razdela faz* [Chemistry of phase interfaces]. Moscow : Mir Publ., 1984. 269 p.
 10. Lipatov Yu. S. *Fiziko-khimicheskiye osnovy napolneniya polimerov* [Physico-chemical foundations of polymer filling]. Moscow : Khimiya Publ., 1991. 260 p.
 11. Roldugin V. I. Samoorganizatsiya nanochastits na mezhfaznykh poverkhnostyakh [Self-organization of nanoparticles on interfacial surfaces]. *Uspekhi khimii* [Russian Chemical Reviews], 2004, vol. 73, no. 2, pp. 123–156.
 12. Gol'dade V. A., Struk V. A., Pesetskiy S. S. *Ingibitory iznashivaniya metallopolimernykh sistem* [Inhibitors of wear of metal-polymer systems]. Moscow : Khimiya Publ., 1993. 240 p.
 13. Khaynike G. *Tribokhimiya* [Tribotechnology]. Moscow : Mir Publ., 1987. 584 p.
 14. Belyy V. A., Egorenkov N. I., Pleskachevskiy Yu. M. *Adgeziya polimerov k metallam* [Adhesion of polymers to metals]. Minsk : Nauka i tekhnika Publ., 1976. 228 p.
 15. Kragel'skiy I. V. *Treniye i iznos* [Friction and wear]. Moscow : Mashinostroyeniye Publ., 1968. 480 p.
 16. Pleskachevskiy Yu. M. O nekotorykh analogiyakh friktsionnogo dinamicheskogo i adgezionnogo staticheskogo kontaktirovaniya metalla s termoplastichnym polimerom [About some analogies of dynamic frictional and adhesive static contact of metal with a thermoplastic polymer]. *Treniye i iznos* [Friction and Wear], 1983, vol. 4, no. 5, pp. 948–951.
 17. Veymarn P. P. *K ucheniyu o sostoyanii materii (osnovaniya kristallizatsionnoy teorii neobratimnykh protsessov)* [To the doctrine of the state of matter (the foundations of the crystallization theory of irreversible processes)]. Saint-Petersburg, 1910. 188 p.
 18. Gusev A. I. *Nanomaterialy, nanostrukturnyye, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies]. Moscow : Fizmatlit Publ., 2007. 416 p.
 19. Ajayan P. M., Schadler L. S., Braun A. V. *Nanocomposite science and technology*. NY : Wiley Publ., 2004. 230 p.
 20. Pul Ch., Ouens F. *Nanotekhnologii* [Nanotechnology]. Moscow : Tekhnosfera Publ., 2005. 334 p.
 21. Kireyev V. *Nanotekhnologii: istoriya vozniknoveniya i razvitiya* [Nanotechnology: history of origin and development]. *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2008, no. 2, pp. 2–10.
 22. Vityaz' P. A., Svidunovich N. A., Kuis D. V. *Nanomaterialovedenie* [Nanomaterials science]. Minsk : Vysheyshaya shkola Publ., 2015. 511 p.
 23. Buchachenko A. L. Nanokhimiya — pryamoy put' k vysokim tekhnologiyam novogo veka [Nanotechnology — a direct path to high technologies of the new century]. *Uspekhi khimii* [Russian Chemical Reviews], 2003, vol. 72, no. 5, pp. 419–437.
 24. Kireyev V. Yu., Vrublevskiy E. M., Nedzvetskiy V. S., Sosnovtsev V. V. Filosofskiy, fizicheskiy i khimicheskiy aspekty ob'yektov i metodov nanotekhnologii [Philosophical, physical and chemical aspects of objects and methods of nanotechnology]. *Information and Innovations*, 2010, spec. is., pp. 2–90.
 25. Vigdorovich V. I., Tsygankova L. E., Osetrov A. Yu. Nanosostoyaniye veshchestva kak osnova reaktivnoy sposobnosti nanomaterialov [Nanostate of Compound as Basis for Nanomaterial Reactivity]. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov* [Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces], 2011, vol. 47, no. 3, pp. 410–415.
 26. Liopo V. A. Razmernaya granitsa mezhdu nano- i ob'emnym sostoyaniem: teoriya i eksperiment [Dimensional boundary between nano- and bulk state: theory and experiment]. *Vesnik GrDU imya Yanki Kupaly. Ser. 2: Matematyka. Fizika. Infarmatyka, vylichal'naya tekhnika i kiravanne* [Bulletin of the Yanka Kupala State University of Grodno. Ser. 2: Mathematics. Physics. Computer science, computing and management], 2007, no. 2, pp. 65–71.
 27. Epshteyn E. M. Debaya teoriya [Debye theory]. *Fizicheskaya entsiklopediya* [Physical encyclopedia]. Ed. A. M. Prokhorov. Moscow : Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1988, vol. 1, pp. 573–574.
 28. Gol'dade V. A., Zotov S. V., Shapovalov V. M., Yudin V. Ye. Elektretnyy effekt v polimernykh nanokompozitakh (Obzor) [Electret effect in polymer nanocomposites (Review)]. *Polimernyye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2019, vol. 5, no. 2, pp. 6–18.
 29. Avdeychik S. V., Liopo V. A., Struk V. A., Prushak V. Ya., Shcherba V. Ya. *Polimer-silikatnyye mashinostroitel'nye materialy: fiziko-khimiya, tekhnologiya, primeneniye* [Polymer-silicate engineering materials: physical chemistry, technology, application]. Eds. V. A. Struk, V. A. Shcherba. Minsk : Tekhnologiya Publ., 2007. 431 p.
 30. Distler G. I., Vlasov V. P., Gerasimov Yu. M., Kobzareva S. A., Kortukova E. I., Lebedeva V. I., Moskvina V. V., Shenyavskaya L. A. *Dekorirovaniye poverkhnosti tverdykh tel* [Decoration of the surface of solid bodies]. Moscow : Nauka Publ., 1976. 112 p.
 31. Belyy V. A., Egorenkov N. I., Pleskachevskiy Yu. M. Yavleniye rastvoreniya metallov rasplavami polimernykh pokrytiy [Phenomenon of dissolution of metals by melts of polymer coatings]. *Vysokomolekulyarnyye soedineniya. Seriya B* [Polymer Science: Series B – Polymer Chemistry], 1970, vol. 12, no. 9, pp. 643–644.
 32. Garkunov D. N. *Tribotekhnika* [Tribotechnology]. Moscow : Mashinostroyeniye Publ., 1985. 424 p.
 33. Mironov V. S. Triboelectret state of polymer composites. *Proceedings of the 7th International Symposium on Electrets (ISE-7)*. Berlin, 1991, pp. 310–315.
 34. Avvakumov E. G. *Mekhanicheskiye metody aktivatsii khimicheskikh protsessov* [Mechanical methods of activation of chemical processes]. Novosibirsk : Nauka Publ., 1979. 259 p.
 35. Grigor'yeva T. F., Barinova A. P., Lyakhov N. Z. *Mekhanokhimicheskiy sintez v metallicheskikh sistemakh* [Mechanochemical synthesis in metal systems]. Ed. E. G. Avvakumov. Novosibirsk : Parallell' Publ., 2008. 311 p.

36. Khint Y. A. *UDA-tehnologiya: problemy i perspektivy* [UDA-technology: problems and prospects]. Tallinn : Valgus Publ., 1981. 36 p.
37. Avdeychik S. V., Struk V. A., Sorokin V. G., Antonov A. S. Osobennosti realizatsii nanorazmernosti v kompozitakh na osnove polimernoy matritsy [Features of the implementation of nanoscale in composites based on a polymer matrix]. *Nanomaterialy i nanostruktury – XXI vek* [Nanomaterials and nanostructures – XXI century], 2016, vol. 7, no. 2, pp. 37–44.
38. Avdeychik O. V., Struk V. A., Ishchenko M. V., Ishchenko R. V., Prushak A. S., Konoplyanik A. V., Barsukov V. V. Kompozitsionnyy tribotekhnicheskii material [Composite tribological material]. Patent BY, no. 16768, 2013.
39. Struk V. A., Kravchenko V. I., Kostyukovich G. A., Avdeychik S. V. Kompozitsionnyy termostoykiy tribotekhnicheskii material [Composite heat-resistant tribotechnical material]. Patent RU, no. 2268273, 2006.
40. Struk V. A., Kravchenko V. I., Kostyukovich G. A., Avdeychik S. V., Ratobyl'skiy S. V., Manulenko A. F., Smuraga O. S. Kompozitsionnyy termoplastichnyy material [Composite thermoplastic material]. Patent RU, no. 2276677, 2006.
41. Struk V. A., Kravchenko V. I., Kostyukovich G. A., Avdeychik S. V., Ovchinnikov E. V., Basinyuk V. L., Gerasimchik I. I., Shkurskiy I. A., Mardosevich E. I. Sostav kompozitsionnogo polimernogo materiala dlya funktsional'nogo pokrytiya i sposob yego naneseniya [Composition of a composite polymer material for a functional coating and a method for its application]. Patent RU, no. 2338764, 2008.
42. Struk V. A., Kravchenko V. I., Kostyukovich G. A., Avdeychik S. V., Bely L. S., Ovchinnikov E. V., Liopo V. A. Sposob izgotovleniya izdeliy iz polimernykh termoplastichnykh materialov [Method of manufacturing products from polymer thermoplastic materials]. Patent RU, no. 2321603, 2008.
43. Struk V. A., Kravchenko V. I., Kostyukovich G. A., Avdeychik S. V., Skaskevich A. A., Chekel' A. V. Kompozitsionnyy termoplastichnyy material [Composite thermoplastic material]. Patent RU, no. 2283325, 2006.
44. Struk V. A., Kravchenko V. I., Kostyukovich G. A., Avdeychik S. V., Ovchinnikov E. V., Liopo V. A., Kletsko V. V., Belotserkovskiy M. A. Sposob formirovaniya kompozitsionnogo pokrytiya iz silikatpolimernogo materiala [Method of forming composite coating from silicate-polymer material]. Patent RU, no. 2332525, 2008.
45. Antonov A. S., Struk V. A., Avdeychik S. V., Vorontsov A. S. Sposob polucheniya nanomodifikatora dlya polimernykh materialov [A method of obtaining a nanomodifier for polymer materials]. Patent BY, no. 22316, 2018.
46. Struk V. A., Kravchenko V. I., Kostyukovich G. A., Avdeychik S. V., Ovchinnikov E. V., Liopo V. A., Kletsko V. V., Belotserkovskiy M. A. Sposob polucheniya nizkorazmernykh napolniteley dlya polimernykh materialov [Method of obtaining low-dimensional fillers for polymer materials]. Patent BY, no. 10901, 2008.
47. Struk V. A., Ovchinnikov E. V., Eysymont E. I., Avdeychik S. V., Shcherba V. Ya., Razumtsev A. P., Mishuk Yu. V. Sposob polucheniya tribotekhnicheskogo materiala na osnove poliamida [Method of obtaining tribotechnical material based on polyamide]. Patent BY, no. 21061, 2017.
48. Struk V. A., Kravchenko V. I., Kostyukovich G. A., Avdeychik S. V., Ovchinnikov E. V., Kletsko V. V., Zayash P. I. Sposob polucheniya metallopolimernogo pokrytiya [Method of obtaining metal-polymer coating]. Patent RU, no. 2332524, 2008.
49. Struk V. A., Avdeychik S. V., Ovchinnikov E. V., Eysymont E. I., Kravchenko V. I. Plastichnaya smazka [Plastic grease]. Application BY, no. a20121815, 2016.
50. Struk V. A., Avdeychik S. V., Ovchinnikov E. V., Kostyukovich G. A., Kravchenko V. I. Sostav kompozitsionnogo smazochnogo materiala [Composition of a composite lubricant]. Patent BY, no. 18073, 2014.

Поступила в редакцию 02.02.2021

© С. В. Авдейчик, В. А. Струк, А. С. Антонов, В. А. Гольдаде, 2020