

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

УДК 678.686
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-4-329-335>

Поступило в редакцию 10.04.2026
Received 10.04.2026

Член-корреспондент Н. Р. Прокопчук, И. О. Лаптик

*Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь
ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь*

**ОСОБЕННОСТИ ЭФФЕКТА РЕБИНДЕРА В НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ
ЭПОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЯХ**

Аннотация. Впервые установлены особенности эффекта Ребиндера в сшитой эпоксидной матрице, содержащей сверхмалые количества (0,005–0,1 мас. %) наночастиц УДА СП, АШ-А, TiO_2 , ZnO , Al_2O_3 , SiO_2 . Оценено адсорбционное понижение водой прочности при ударе и твердости наномодифицированных покрытий по стали в сравнении с немодифицированными покрытиями. Предлагаемый механизм снижения эффекта Ребиндера наночастицами заключается в следующем. В результате взаимодействия электрических зарядов на поверхности наночастиц с диполями полярных эпоксидных и гидроксильных групп в макромолекулах эпоксидной смолы образуются силы Ван-дер-Ваальса, дополнительные к существующим поперечным химическим связям отвердителя. В результате образуется система по типу взаимопроникающих сеток. Сегментальные движения на участках макромолекул между узлами химической сетки замедляются, потенциальный барьер разрыва химических связей в макромолекулах эпоксидной смолы повышается. Прочность при ударе и твердость покрытий возрастают. Установлена корреляция между значением компенсации эффекта Ребиндера и величиной электрического заряда на поверхности наночастиц. Таким образом, наномодифицирование эпоксидных покрытий даже сверхмалыми количествами наночастиц (0,005 мас. %) позволяет существенно снизить отрицательное действие эффекта Ребиндера, вызываемого водой. Это имеет важное практическое значение, так как антикоррозионные покрытия, эксплуатируемые в атмосфере, периодически подвергаются воздействию осадков.

Ключевые слова: эпоксидная смола, эффект Ребиндера, наночастицы, твердость, прочность при ударе

Для цитирования. Прокопчук, Н. Р. Особенности эффекта Ребиндера в наномодифицированных эпоксидных покрытиях / Н. Р. Прокопчук, И. О. Лаптик // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2026. – Т. 70, № 4. – С. 329–335. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-4-329-335>

Corresponding Member Nikolay R. Prokopchuk, Inna O. Laptik

*Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus
13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus*

FEATURES OF THE REBINDER EFFECT IN NANOMODIFIED EPOXY COATINGS

Abstract. For the first time, we have established the features of the Rebinder effect in a cross-linked epoxy matrix containing ultra-small amounts (0.005–0.1 wt. %) of UDA SP, ASH-A, TiO_2 , ZnO , Al_2O_3 , SiO_2 nanoparticles. The water-induced adsorption reduction of impact strength and hardness of nanomodified coatings on steel was evaluated in comparison with non-modified coatings. The proposed mechanism for the reduction of the Rebinder effect by nanoparticles is as follows. As a result of the interaction of electric charges on the surface of nanoparticles with the dipoles of polar epoxy and hydroxyl groups in the macromolecules of epoxy resin, Van der Waals forces form in addition to the existing cross-linking chemical bonds of the hardener. As a result, an interpenetrating network-type system is formed. The mobility of the macromolecule segments between cross-link nodes is reduced, and the energy barrier for bond rupture in epoxy resin macromolecules increases. The impact strength and hardness of coatings increase. A correlation has been established between the degree of compensation for the Rebinder effect and the magnitude of the electric charge

on the nanoparticle surface. Thus, the nanomodification of epoxy coatings with even ultra-small amounts of nanoparticles (0.005 wt. %) makes it possible to significantly reduce the negative impact of the Rebinder effect caused by water. This is of great practical importance, since anti-corrosion coatings operated in the atmosphere are periodically exposed to precipitation.

Keywords: epoxy resin, Rebinder effect, nanoparticles, hardness, impact strength

For citation. Prokopchuk N. R., Laptik I. O. Features of the Rebinder effect in nanomodified epoxy coatings. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2026, vol. 70, no. 4, pp. 329–335 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-4-329-335>

Введение. Эффект Ребиндера был открыт в 1928 г. и подробно описан как влияние адсорбционных жидкостей на понижение прочности кристаллических тел [1]. Однако он имеет более общий характер и наблюдается при деформировании в жидких средах аморфных твердых тел, а также полимеров [2]. Эффект Ребиндера – это механизм адсорбционного понижения жидкостями прочности твердых тел при их упругом нагружении, когда выполняется уравнение Гриффита. Молекулы адсорбционно-активных сред (ААС) атакуют межмолекулярные связи в вершинах растущих трещин разрушаемого полимера, и, адсорбируясь на свежесформированных поверхностях, ослабляют их [3].

Эффект Ребиндера сильнее проявляется при действии полярных жидкостей на полярные полимеры и наоборот. Разрыв межмолекулярных связей полярной жидкостью приводит к «обнажению» на поверхности полярного полимера как углеводородных участков, так и полярных групп макромолекул. Взаимодействие полимера с жидкостью уменьшает потенциальный барьер разрыва макромолекул полимера фактически за счет снижения межмолекулярных взаимодействий, так как химические связи при этом не меняют своей энергии [4; 5].

Практическая значимость исследований эффекта Ребиндера и их применение во многих технологических процессах чрезвычайно велика.

При деформировании в ААС стеклообразного полимера он диспергируется на систему фибриллярных агрегатов из ориентированных макромолекул диаметром 1–20 нм, разобщенных в пространстве микропустотами такого же размера (явление крейзинга). Процесс зарождения крейзов регулируется термодинамическим критерием Гриффита [6–9].

С помощью эффекта Ребиндера были созданы полимерные сорбенты и мембраны с наноразмерными порами, получены наномодифицированные полимеры с различными свойствами [10]. Практическая значимость эффекта Ребиндера чрезвычайно велика. Облегчение разрушения ААС является ключевым элементом многих технологических процессов, например, резание металлов с использованием смазочно-охлаждающих жидкостей, бурение горных пород в водных растворах ПАВ [11], дробление и измельчение материалов в жидких размольных средах и др., термовакуумная подготовка (десорбция ПАВ) сорбентов и катализаторов перед эксплуатацией с целью восстановления их первоначальной прочности [12], проявление эффекта Ребиндера при испытаниях жаропрочных сплавов в контексте с расплавами солей [13].

Вместе с тем непрогнозируемое снижение прочности конструкций, трубопроводов и др. под действием ААС может привести к значительным экономическим потерям и даже катастрофическим последствиям.

Таким образом, несмотря на прогресс в исследованиях эффекта Ребиндера, достигнутый значительный уровень в понимании механизмов разрушения твердых тел при контакте с ААС, некоторые системы остаются не изученными, в частности, влияние наночастиц разной природы на проявление эффекта Ребиндера в полимерных композиционных материалах.

Цель работы – оценить влияние наночастиц различной природы на адсорбционное понижение водой прочности при ударе и твердости антикоррозионных покрытий по стали.

Материалы и методы исследований. Для получения антикоррозионных покрытий по стали использовали наиболее эффективную композицию естественного отверждения: эпоксидную смолу KER 828 и отвердитель естественной сушки Cardolite 540 (Феналкамин), обеспечивающий высокое содержание поперечных химических связей, соединяющих олигомерные молекулы в пространственную сетчатую структуру покрытий, и наилучший комплекс их механических свойств.

Наномодификация пленкообразователя осуществлялась наночастицами АШ-А (алмазо-содержащая шихта – ТУ РБ 100056180.003-2003), УДА СП (ультрадисперсный алмаз – ТУ РБ 28619110.001-95) производства НП ЗАО «Синта» (Республика Беларусь); нанопорошки оксида цинка ZnO, диоксида титана TiO₂, оксида алюминия Al₂O₃ и оксида кремния SiO₂ производства Hebei Suoyi Material Technology (Китай).

Природа примененных наночастиц и их характеристики представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Природа наночастиц и их характеристики по данным производителей

Table 1. The nature of nanoparticles and their characteristics according to manufacturers

Химическая формула наночастиц Chemical formula of nanoparticles	Размер наночастиц, нм Nanoparticle size, nm	Площадь удельной поверхности, м ² /г Specific surface area, m ² /g	ТСТ, пА
УДА СП	4–6	295	–5,0
АШ-А	10	404	–4,0
TiO ₂	20–30	12,5	–4,0
ZnO	30	12–20	–3,5
Al ₂ O ₃	30	30–60	–2,0
SiO ₂	30	25–50	–1,0

Наночастицы имели широкий размерный ряд 4–30 нм. Их равномерное распределение в композициях в количествах 0,005; 0,01; 0,1 мас. % достигалось диспергированием в ультразвуковой ванне в течение 30 мин. Результат измерения термостимулированных токов (ТСТ) на поверхности наночастиц опубликован в [14].

Отверждение покрытий осуществлялось в течение суток при 20 °С. Определение их физико-химических свойств и адсорбцию воды на этих покрытиях проводили через 5 суток после полного завершения формирования надмолекулярной структуры покрытий. Толщина отвержденных покрытий составляла 100–110 мкм. Адсорбцию воды на поверхности покрытий по стали проводили погружением пластин в воду на 1 ч. После извлечения пластин из воды на поверхности антикоррозионного покрытия формировалась сплошная однородная водная пленка без воздушных включений. Испытание на физико-химические свойства проводили в течение 2 ч после извлечения из воды, не допуская ее испарения. Гель-фракцию отвержденных покрытий определяли общепринятым методом [15]. Антикоррозионные покрытия по стали (08 кп) получали путем нанесения системы эпоксидная смола/отвердитель на заранее подготовленные металлические подложки аппликатором толщиной 250 мкм. Твердость покрытий определяли с помощью маятникового прибора ТМЛ по ГОСТ 5233-89; прочность при ударе – по ГОСТ 4765-73.

Результаты и их обсуждение. В табл. 2 представлены данные по изменению надмолекулярной структуры (гель-фракция) и механических свойств антикоррозионных покрытий (их воздушной и водной поверхности) в зависимости от природы и количества введенных в них наночастиц.

Анализ этих данных показывает:

с увеличением концентрации всех шести видов наночастиц от 0,005 до 0,1 мас. % гель-фракция, прочность при ударе и твердость покрытий снижаются. Содержание наночастиц в композиции свыше 0,005 мас. % приводит к агломерации их избытка, как следствие снижению плотности межмолекулярных взаимодействий, образованных электрическими зарядами на поверхности наночастиц и полярными группами в макромолекулах эпоксидной смолы (сил Ван-дер-Ваальса). Структурирование и устойчивость в поле механических сил снижаются;

при трех концентрациях наночастиц наблюдается один и тот же ряд эффективности наномодифицирования антикоррозионных покрытий: УДА СП > АШ-А > TiO₂ > ZnO > Al₂O₃ > SiO₂ как для воздушной, так и для водной поверхности. В этом же ряду убывают значения термостимулированных токов от –5,0 до –1,0 пА на поверхности наночастиц.

Чем выше заряд на поверхности наночастиц, тем больше возрастают межмолекулярные взаимодействия в защитном покрытии и плотность покрытия, а следовательно, растет его твердость. Дополнительная эластичная физическая сетка выступает демпфером, принимая на себя энергию падающего бойка и прочность покрытий при ударе возрастает с 50 до 70 см.

Т а б л и ц а 2. Влияние природы наночастиц и их концентрации на гель-фракцию, прочность при ударе и твердость антикоррозионных покрытий

Table 2. The effect of the nature of nanoparticles and their concentration on the gel fraction, impact strength and hardness of anticorrosive coatings

Отвердитель, эпоксидная смола Hardener, epoxy resin	Наночастицы Nanoparticles	Концентрация наночастиц, мас. % Concentration of nanoparticles, wt. %	Гель-фракция, % Gel fraction, %	Воздушная поверхность Air surface		Водная поверхность Water surface	
				σ_y , см	Тв., отн. ед.	σ_y , см	Тв., отн. ед.
Cardolite 540 + смола KER 828	—	—	60,0	50	0,52	30	0,39
	УДА СП	0,005	87,0	70	0,80	55	0,63
	АШ-А		85,5	68	0,77	53	0,63
	TiO ₂		87,0	70	0,79	52	0,61
	ZnO		86,0	67	0,76	52	0,62
	Al ₂ O ₃		80,5	65	0,75	50	0,56
	SiO ₂		77,0	62	0,65	45	0,53
	УДА СП	0,01	79,0	65	0,75	52	0,61
	АШ-А		78,0	63	0,73	51	0,60
	TiO ₂		77,5	64	0,74	50	0,59
	ZnO		78,0	62	0,69	50	0,59
	Al ₂ O ₃		75,0	55	0,66	45	0,52
	SiO ₂		73,5	53	0,63	42	0,50
	УДА СП	0,1	77,0	60	0,67	48	0,59
	АШ-А		76,0	58	0,65	46	0,57
	TiO ₂		75,0	57	0,64	45	0,56
	ZnO		73,0	56	0,65	45	0,55
	Al ₂ O ₃		70,5	52	0,60	42	0,49
	SiO ₂		68,0	50	0,52	40	0,47

Таким образом, еще раз показана решающая роль энергетического состояния поверхности наночастиц в формировании дополнительных физических взаимодействий в надмолекулярной структуре и свойств полимерных наномодифицированных композиций.

Антикоррозионные наномодифицированные покрытия обладают надмолекулярной структурой типа взаимопроникающих сеток. Химическая сетка, образованная молекулами отвердителя и макромолекулами эпоксидной смолы, пронизывается физической сеткой, созданной наночастицами и полярными группами смолы (силами Ван-дер-Ваальса). Сегментальные движения сетки замедляются, потенциальный барьер разрыва химических связей в макромолекулах эпоксидной смолы повышается, увеличиваются прочность при ударе и твердость покрытий.

Влияние наночастиц на эффект Ребиндера в антикоррозионных эпоксидных покрытиях иллюстрируется рис. 1 и 2. Так как разрушение полимеров – это процесс развития новых поверхностей, сопровождающийся снижением межмолекулярных взаимодействий (уменьшением работы разрушения), то большая доля межмолекулярных взаимодействий (сил Ван-дер-Ваальса) на поверхности наномодифицированных образцов не разрушается адсорбированной водой и процент сохранения прочности при ударе и твердости возрастает на 70–80 % по сравнению с немодифицированным покрытием.

На рис. 1 представлена графическая зависимость влияния природы наночастиц и их концентрации на сохранение прочности при ударе покрытия.

Таким образом, наномодифицирование эпоксидных покрытий сверхмалыми количествами (0,005 мас. %) наночастиц, особенно TiO₂, ZnO, УДА СП, позволяет существенно снизить отрицательное действие эффекта Ребиндера, вызванного водой. Это имеет важное практическое значение, так как антикоррозионные покрытия, эксплуатируемые в атмосфере, периодически подвергаются воздействию осадков.

Это свидетельствует о том, что чем выше заряд на поверхности наночастиц, тем сильнее об-
разуются силы Ван-дер-Ваальса, тем меньше процент снижения прочности при ударе (σ_y), тем
меньше отрицательное действие эффекта Ребиндера.

Аналогичные результаты получены по влиянию наночастиц на твердость покрытий.

На рис. 2 представлена зависимость замедления адсорбционного понижения водой твердости
антикоррозионных покрытий наночастицами разной природы в различных концентрациях.

Из данных рис. 2 следует, чем сильнее межмолекулярное взаимодействие сил Ван-дер-Ваальса,
тем плотнее надмолекулярная структура покрытий, тем выше их твердость.

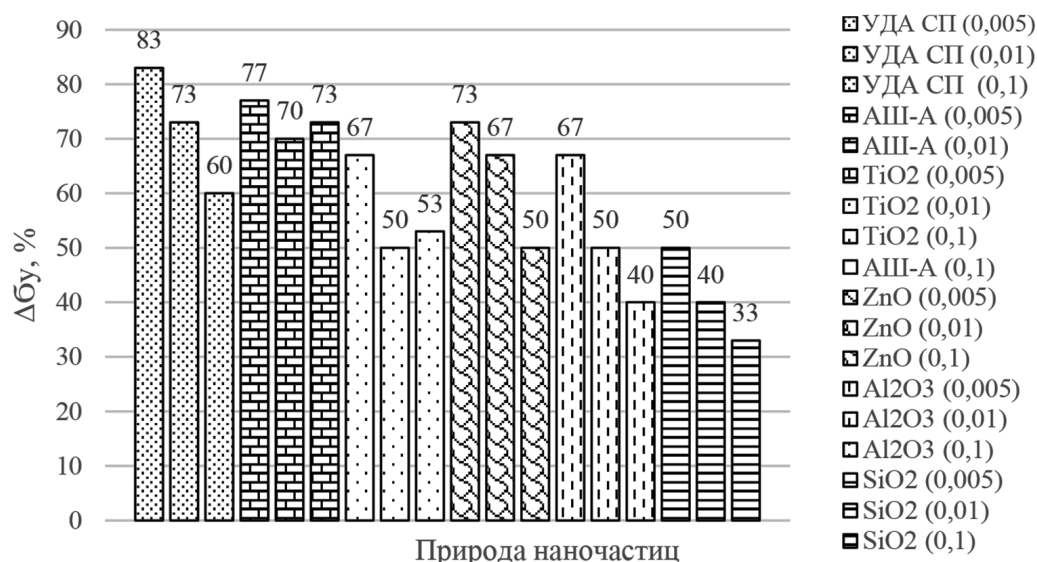


Рис. 1. Влияние природы и концентрации наночастиц на адсорбционное понижение водой прочности при ударе покрытий

Fig. 1. The influence of the nature and concentration of nanoparticles on the adsorption decrease in water impact strength of coatings

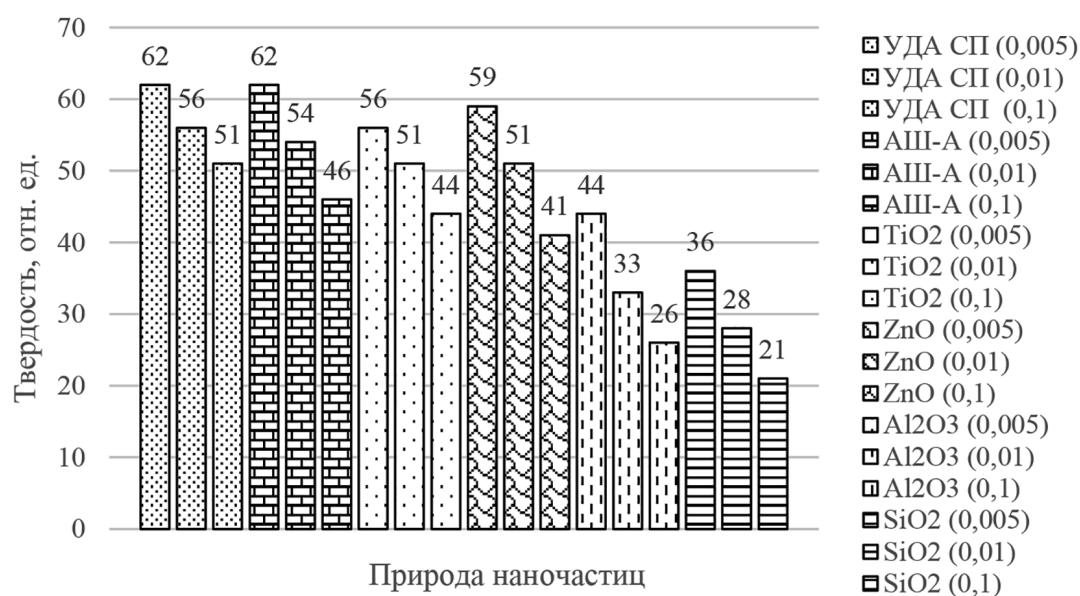


Рис. 2. Зависимость замедления адсорбционного понижения водой твердости антикоррозионных покрытий наночастицами разной природы и концентрации

Fig. 2. Dependence of the deceleration of the adsorption decrease in the hardness of anticorrosive coatings by nanoparticles of different nature and concentration by water

Заключение. Несмотря на то что эффект Ребиндера был открыт в 1928 г., подробно изучен при воздействии на твердые тела (металлы, полимерные материалы, горные породы и др.) различных адсорбционно-активных сред, широко применяется на практике во многих технологических процессах, его проявление в наномодифицированных полимерных композитах до сих пор не исследовано.

Нами установлена существенная компенсация адсорбционного понижения прочности водой антикоррозионных покрытий наночастицами различной природы. Наночастицы с большим электрическим зарядом на поверхности (УДА СП, АШ-А, TiO_2 , ZnO), введенные в покрытия в сверхмалых количествах (0,005 мас. %) снижают отрицательный эффект Ребиндера на 70–80 % по сравнению с немодифицированным образцом. Механизм этого действия может заключаться в следующем. Наночастицы, равномерно распределяясь по всему объему сетчатой структуры композита, взаимодействуют электростатически с полярными эпоксидными и гидроксильными группами эпоксидной смолы, образуя силы Ван-дер-Ваальса, дополнительно связывающие макромолекулы. Создается система по типу взаимопроникающих сеток: химической (молекул отвердителя с молекулами эпоксидной смолы) и физической (сил Ван-дер-Ваальса). Сегментальные движения на участках макромолекул эпоксидной смолы между узлами химической сетки замедляются, потенциальный барьер разрыва химических связей в макромолекулах эпоксидной смолы повышается. Как результат – рост устойчивости наномодифицированных покрытий в силовых полях (рост твердости и прочности при ударе). Так как разрушение полимеров – это процесс развития новых поверхностей, сопровождающийся снижением межмолекулярных взаимодействий (уменьшение работы разрушения), то большая доля межмолекулярных взаимодействий, остающаяся на поверхности наномодифицированных образцов при адсорбции воды, в большей мере сохраняет твердость и прочность при ударе. Полученные результаты имеют также важное практическое значение, так как антикоррозионные покрытия, эксплуатируемые в атмосфере, периодически подвергаются воздействию осадков.

Благодарности. Работа финансировалась в рамках ГПНИ «Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии», подпрограмма «Наноструктуры, наноматериалы и технологии» на 2026–2030 годы, НИР «Наномодифицирование ПА-6 и эпоксидных смол наночастицами различной природы для улучшения комплекса их эксплуатационных свойств».

Acknowledgements. The work was funded as part of the State Program “Modern materials science, promising materials, and new technologies”, subprogram “Nanostructures, nanomaterials, and technologies” for 2026–2030, “Nanomodification of PA-6 and epoxy resins with nanoparticles of various natures to improve their performance properties”.

Список использованных источников

1. Ребиндер, П. А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика / П. А. Ребиндер; под общ. ред. Г. И. Фукса, Н. В. Перцова. – М., 1979. – 384 с.
2. Тынный, А. Н. Прочность и разрушение полимеров при воздействии жидких сред / А. Н. Тынный. – Киев, 1975. – 208 с.
3. Волынский, А. Л. Особенности эффекта Ребиндера в полимерах. Обзор / А. Л. Волынский, Н. Ф. Бакеев // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2013. – Т. 49, № 5. – С. 451–470. <https://doi.org/10.7868/S0044185613050100>
4. Малкин, А. И. Закономерности и механизмы эффекта Ребиндера / А. И. Малкин // Коллоидный журнал. – 2012. – Т. 74, № 2. – С. 239–256.
5. Структурный подход к исследованию механизма деформации аморфных полимеров / А. Л. Волынский, А. И. Кулебякина, Д. А. Панчук [и др.] // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2007. – Т. 49, № 12. – С. 2063–2084.
6. Общие закономерности формирования и структура металлонаполненных полимерных наноконпозиций на основе крейзованных полимерных матриц / О. В. Аржакова, С. Ю. Ермушева, Л. М. Ярышева [и др.] // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2003. – Т. 45, № 6. – С. 955–962.
7. Структура и стабильность олигомер-полимерных смесей на основе полиэтилентерефталата, деформированного по механизму крейзинга / А. Ю. Ярышева, В. В. Полянская, Е. Г. Рухля [и др.] // Коллоидный журнал. – 2011. – Т. 73, № 4. – С. 565–571.
8. Ярышева, Л. М. Крейзинг как метод создания пористых материалов / Л. М. Ярышева, А. Л. Волынский, Н. Ф. Бакеев // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. – 1993. – Т. 35, № 7. – С. 913–921 (на англ. яз.).
9. Кристаллизация гидроксиапатита в пористых полимерных матрицах, полученных по механизму крейзинга / Н. Ф. Бакеев, А. Л. Волынский, Н. И. Никанорова [и др.] // Доклады Академии наук. – 2009. – Т. 426, № 1. – С. 63–65.

10. Трофимчук, Е. С. Получение пленочных композитов на основе крейзованных полимеров и наночастиц силиказоля / Е. С. Трофимчук, Н. И. Никонорова, Е. А. Нестерова [и др.] // Российские нанотехнологии. – 2009. – Т. 4, № 9–10. – С. 164–166.
11. Малкин, А. И. Эффект Ребиндера в разрушении металлов и горных пород / А. И. Малкин, Д. А. Попов // Физика металлов и металловедение. – 2022. – Т. 123, № 12. – С. 1313–1324. <https://doi.org/10.31857/S0015323022600678>
12. Лепин, И. В. Адсорбционное понижение прочности сорбентов и катализаторов / И. В. Лепин, Т. К. Григорова, В. И. Соколенко // Вопросы атомной науки и техники. – 2018. – № 5. – С. 87–91 (на англ. яз.).
13. Эффект Ребиндера при испытаниях жаропрочных сплавов в контакте с расплавами солей / Л. Б. Гецов, М. Ю. Баландина, А. И. Грищенко [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2021. – Т. 87, № 10. – С. 54–62. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-10-54-62>
14. Прокопчук, Н. Р. Роль энергетического состояния поверхности наночастиц в формировании структуры и свойств полимерных нанокомпозитов / Н. Р. Прокопчук, И. О. Лаптик // Полимерные материалы и технологии. – 2025. – Т. 11, № 3. – С. 28–35. <https://doi.org/10.32864/polymmattech-2025-11-3-28-35>
15. Карякина, М. И. Лабораторный практикум по испытанию лакокрасочных материалов и покрытий. – М., 1977. – 240 с.

References

1. Rebinder P. A. *Selected works. Surface Phenomena in Dispersed Systems. Physico-Chemical Mechanics*. Moscow, 1979. 384 p. (in Russian).
2. Tynnyu A. N. *Strength and Destruction of Polymers under the Influence of Liquid Media*. Kiev, 1975. 208 p. (in Russian).
3. Volynskii A. L., Bakeev N. F. Regularities of the Reh binder effect in polymers. Review. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2013, vol. 49, no. 5, pp. 493–509. <https://doi.org/10.1134/s2070205113050109>
4. Malkin A. I. Regularities and mechanisms of the Reh binder's effect. *Colloid Journal*, 2012, vol. 74, no. 2, pp. 223–238. <https://doi.org/10.1134/s1061933x12020068>
5. Volynskii A. L., Kulebyakina A. I., Panchuk D. A., Moiseeva S. V., Bol'shakova A. V., Grokhovskaya T. E., Yarysheva L. M., Kechek'yan A. S., Bazhenov S. L., Bakeev N. F. Structural approach to the study of deformation mechanism of amorphous polymers. *Polymer Science, Series A*, 2007, vol. 49, no. 12, p. 1265–1283. <https://doi.org/10.1134/s0965545x07120048>
6. Arzhakova O. V., Ermusheva S. Yu., Yarysheva L. M., Volynskii A. L., Bakeev N. F. General features of formation and structure of metal-filled polymer nanocompositions based on crazed polymer matrices. *Polymer Science, Series A*, 2003, vol. 45, no. 6, pp. 573–578.
7. Yarysheva A. Yu., Polyanskaya V. V., Dement'ev A. I., Rukhlya E. G., Volynskii A. L., Bakeev N. F. Structure and stability of oligomer-polymer blends based on poly(ethylene terephthalate) deformed by crazing mechanism. *Colloid Journal*, 2011, vol. 73, no. 4, pp. 575–580. <https://doi.org/10.1134/s1061933x11040193>
8. Yarysheva L. M., Volynskij A. L., Bakeev N. F. Environmental crazing as a method of preparation of porous materials. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya B* [Polymer Science. Series B], 1993, vol. 35, no. 7, pp. 913–921.
9. Bakeev N. F., Volynskii A. L., Nikonorova N. I., Abramchuk S. S., Trofimchuk E. S., Fadeeva I. V., Barinov S. M. Hydroxyapatite crystallization in porous polymer matrices produced by crazing. *Doklady Chemistry*, 2009, vol. 426, pp. 111–113. <https://doi.org/10.1134/s001250080905005x>
10. Trofimchuk E. S., Nikonorova N. I., Nesterova E. A., Muzafarov A. M., Meshkov I. B., Volynskii A. L., Bakeev N. F. Preparing film composites based on crazed polymers and silica sol nanoparticles. *Nanotechnologies in Russia*, 2009, vol. 4, pp. 736–740. <https://doi.org/10.1134/s199507800909016x>
11. Malkin A. I., Popov D. A. The Rebinder effect in fracturing of metals and rocks. *Physics of Metals and Metallography*, 2022, vol. 123, pp. 1234–1244. <https://doi.org/10.1134/s0031918x22601585>
12. Lepin I. V., Grigorova T. K., Sokolenko V. I. Adsorptive strength reduction of sorbents and catalysts. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2018, vol. 117, no. 5, pp. 87–91.
13. Getsov L. B., Balandina M. Yu., Grishchenko A. I., Laptev A. B., Puzanov A. I. The Reh binder effect in tests of superalloys in contact with molten salts. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2021, vol. 87, no. 10, pp. 54–62 (in Russian). <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-10-54-62>
14. Prokopchuk N. R., Lapтик I. O. The role of the energy state of the nanoparticle surface in the formation of the structure and properties of polymer nanocomposites. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2025, vol. 11, no. 3, pp. 28–35. <https://doi.org/10.32864/polymmattech-2025-11-3-28-35>
15. Karyakina M. I. *Laboratory Practice on Testing of Paint and Varnish Materials and Coatings*. Moscow, 1977. 240 p. (in Russian).

Информация об авторах

Прокопчук Николай Романович – член-корреспондент, д-р хим. наук, профессор. E-mail: nrprok@mail.com. ORCID: 0000-0001-7290-1199.

Лаптик Инна Олеговна – аспирант. E-mail: inna.laptik@yandex.ru.

Information about the authors

Prokopchuk Nikolay R. – Corresponding Member, D. Sc. (Chemistry), Professor. E-mail: nrprok@mail.com. ORCID: 0000-0001-7290-1199.

Laptik Inna O. – Postgraduate Student. E-mail: inna.laptik@yandex.ru.