

УДК 544.72 : 538.9 (075.8)

## СОТРУДНИЧЕСТВО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА С БЕЛОРУССКИМИ ОРГАНИЗАЦИЯМИ В ОБЛАСТИ ПОВЕРХНОСТНО-НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОВ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ: ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*Плескунов И.В.<sup>1,3</sup>, Сырков А.Г.<sup>2</sup>, Прокопчук Н.Р.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Евразийская горно-геологическая группа*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский горный университет*

<sup>3</sup>*Белорусский государственный технологический университет*

### АННОТАЦИЯ

Проанализированы результаты совместных работ в области нанотехнологий Санкт-Петербургского горного университета (СПГУ) с белорусскими горно-химическими предприятиями и Белорусским государственным технологическим университетом в 2003-2021 гг. Основными итогами сотрудничества стали опубликованные в высококвартильных журналах результаты исследований по новому научному направлению, посвященному закономерностям усиления защитных свойств органополимерных композиций наноалмазными частицами и путем наноструктурного модифицирования поверхности неорганических присадок. Результаты научных разработок внедрены на десяти предприятиях России и Беларуси. Совместно проводится Международный симпозиум «Нанозифика и Наноматериалы», читаются лекции по программе «Приглашенный профессор», готовятся научные кадры высшей квалификации и издаются учебные пособия и научные монографии.

**Ключевые слова:** низкоразмерные структуры, наноматериалы, металлы, модифицирование, наноуглерод, горно-химические предприятия, защита металла, сотрудничество Россия-Беларусь

## COOPERATION BETWEEN MINING INSTITUTE AND BELARUSIAN ORGANIZATIONS IN THE FIELD OF SURFACE-NANOSTRUCTURED METALS AND MATERIAL SCIENCE: RESULTS AND PERSPECTIVES

*Pleskunov I.V.<sup>1,3</sup>, Syrkov A.G.<sup>2</sup>, Prokopchuk N.R.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Eurasian mining and geological group*

<sup>2</sup>*Saint-Petersburg Mining University*

<sup>3</sup>*Belarusian State Technological University*

## ABSTRACT

The results of joint work in the field of nanotechnology of the St. Petersburg Mining University with the Belarusian mining and chemical enterprises and the Belarusian State Technological University in 2003-2021 are analyzed. The main total of the cooperation are the results of research published in high quartile journals in a new scientific direction devoted to the regularities of enhancing the protective properties of organopolymer compositions by nanodiamond particles and by nanostructured modification of the surface of inorganic additives. The results of scientific developments have been introduced at ten enterprises in Russia and Belarus. The International symposium "Nanophysics and Nanomaterials" is jointly held, lectures are given under the "Visiting professor" program, highly qualified scientific personnel is trained and textbooks and scientific monographs are published.

**Keywords:** low-dimension structures, nanomaterials, metals, modification, nanocarbon, mining-chemical enterprises, metal protection, Russian-Belarusian cooperation.

В конце октября 2021 г. мы стали свидетелями дальнейшего укрепления Союзного государства (Россия-Беларусь). Официально были приняты и подписаны президентами РФ и РБ 20 программ сотрудничества в самых различных областях, включая науку и образование. Взаимодействие и совместные научные исследования Санкт-Петербургского горного университета (СПГУ) в лице кафедры общей и технической физики и Центра нанотехнологий СПГУ с предприятиями Беларуси в области нанотехнологий начались без малого почти 20 лет назад. В 2003 г. профессор Сырков А.Г и первокурсник тогда ещё Горного института (СПГИ) – Плескунов И.В. (родом из г. Солигорска, РБ) – направили свои предложения по защите металлоконструкций от коррозии главному инженеру РУП ПО «Беларуськалий». Надо заметить, что в ту пору СПГИ готовил кадры для этого знаменитого предприятия Беларуси, которое дает самую высокую валютную выручку республике, экспортируя калийные удобрения в десятки стран мира. Многие ведущие специалисты «Беларуськалия», включая нынешнего генерального директора, – выпускники Горного института (ныне Горного университета). Руководство РУП ПО «Беларуськалий» с интересом отнеслось к техническим предложениям А.Г. Сыркова и сотр., несмотря на то, что на предприятии уже испытывали свои антикоррозийные технологии представители польских и герман-

ских фирм. В 2004 г. исследователи из СПГИ приступили к совместным работам в рамках хоздоговора №1, заключенного с ОАО «Белгорхимпром» на тему «Разработка защитных покрытий для металлоконструкций РУП ПО «Беларуськалий». Немного позже, после получения положительных результатов в испытаниях непосредственно на предприятии в г. Солигорске, был заключен новый хоздоговор №2 «Разработка защитных покрытий вагонов РУП ПО «Беларуськалий» (2005-2006 г.г.). В лабораторных и промышленных испытаниях были найдены составы наноструктурированных покрытий для стальных крыш вагонов (хопперов-минераловозов), которые решили проблему коррозионного разрушения крыши вагонов подвижного железнодорожного транспорта под действием хлорсодержащих перевозимых калийных удобрений. По сравнению с западными аналогами предложения СПГИ были намного дешевле, использовали доступное отечественное сырье [1-3]. Помимо традиционных методов контроля коррозии, включая гравиметрические и визуальные, применяли метод РФЭ-спектроскопии для анализа поверхностного слоя металла в ходе длительных коррозионных испытаний (не менее полугода) [1, 4, 5]. В этой части выполнения хоздоговоров №1 и №2 мы получили ещё один опыт успешного международного сотрудничества. В ноябре 2005 г. А.Г. Сырков во время командировки в Германию совместно со своей ученицей к.х.н. Л.В. Маховой детально изучил с помощью РФЭ-спектров и др. методов Университета г. Лейпцига механизм взаимодействия техногенных примесей в атмосфере РУП ПО «Беларуськалий» с поверхностью стали. Эти исследования позволили установить, что железо практически не окисляется, когда сталь покрывается двумя слоями олифы натуральной с наноструктурированным наполнителем, полученным методом твердофазного гидридного синтеза, а также в случае нанопокрытия, наносимого в виде аммониевых препаратов с разноразмерными молекулами (длинами органических радикалов у атома азота) [4-6].

При выполнении хоздоговоров с белорусскими предприятиями и проведении совместных исследований и испытаний исполнители из СПГИ наиболее плотно сотрудничали с заведующим лабораторией ОАО «Белгорхимпром» А.А. Кибалко и зам. главного инженера РУП ПО «Беларуськалий» В.Н. Плескуновым [2, 7], а также с главным инженером «Беларуськалия» В.М. Кириенко.

Цель данной работы состояла в том, чтобы проанализировать, как совместные работы с ОАО «Белгорхимпром» и РУП ПО «Беларуськалий» в 2004-2006 г.г. повлияли на вектор развития научного коллектива в СПГУ и на

дальнейшее сотрудничество в области нанотехнологий с предприятиями и университетами Беларуси.

Выполнение хоздоговоров с ОАО «Белгорхимпром» инициировало подготовку и написание целого ряда диссертаций, посвященных изучению механизма формирования защитных свойств поверхности металла в процессе твердотельного гидридного синтеза или хемосорбции аммониевых и кремнийорганических соединений [3, 8, 9]. Особенностью подготовленных диссертаций явилось то, что они, в основном, защищались по фундаментальным научным дисциплинам (физическая химия, химия твердого тела) и все завершились внедрением результатов на практике. Результаты работы Д.С. Быстрова были внедрены с экономическим эффектом на РУП ПО «Беларуськалий» (2006), И.В. Пантюшина – в НИИ «Энергосталь» (2010), Е.В. Ремзовой – в ОАО «Белгорхимпром», Е.А. Назаровой – в ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством» (2012). В работе Назаровой Е.А., защищенной в 2016 г., решалась проблема не только существенного повышения коррозионной стойкости металла, но и усиления его гидрофобных и антифрикционных свойств. В перечисленных исследованиях, как и во всех последующих защищенных диссертациях, большое внимание уделялось доказательству важности хорошей адгезии пленки, нанесенной на металл, к твердой подложке для достижения высоких и стабильных защитных и антифрикционных свойств поверхности металла. В докторской диссертации Н.С. Пщелко, защищенной в 2011 г., в частности была обоснована значимость не только необратимой хемосорбции вещества пленки на металле, но и перспективность предложенных автором электроадгезионных технологий [10].

Предоставленные белорусскими предприятиями возможности испытаний на промышленных объектах сыграли неоценимую роль в обосновании теоретических положений и лабораторных результатов, полученных в стенах СПГУ в 2001 – 2016 г.г. В эти годы организация испытаний на горно-химических предприятиях России представляла большую проблему. Попасть для их осуществления, например, в «Уралкалий», ближайший аналог «Беларуськалия», было практически невозможно. Дело в том, что руководство региона приняло решение отдать приоритет во внедрении разработок на уральских предприятиях местным НИИ и университетам.

Качественно новый этап развития отношений с белорусскими организациями начинается в 2017 г. Весной этого года Сырков А.Г. по гранту ректора СПГУ едет на стажировку в Беларусь, в Минск и Солигорск. Его там встречает Плескунов И.В. – бывший студент СПГИ, а теперь глава представительства

компании IMS Montan в Беларуси. Он организует научную работу и повышение квалификации А.Г. Сыркова в Беларусском национальном техническом университете (БНТУ), в Беларусском государственном технологическом университете (БГТУ), а также экскурсии и переговоры в компании «Славкалий», в Солигорском филиале ОАО «Белгорхимпром», в РУП ПО «Беларуськалий». На самом высоком уровне были организованы встречи с академиком НАН РБ В.П. Крутько (ИОНХ НАН Беларуси), с ректором БГТУ Войтовым И.В., с работающими в БГТУ академиком РАН и НАН РБ Цыгановым А.Р. и членом-корреспондентом НАН РБ Прокопчуком Н.Р. Достаточно сказать, что информация о встрече ректора БГТУ с Сырковым А.Г. и Плескуновым И.В. 2 мая 2017 г. была помещена на сайте БГТУ с фотографиями и статьей о содержании переговоров. Основное отличие сотрудничества этого периода от более раннего состояло в том, что началось очень плодотворное взаимодействие с научной элитой республики Беларусь, которое опиралось на опыт совместных работ с практиками белорусских промышленных предприятий.

Ректор БГТУ, профессор И.В. Войтов, узнав о направленности исследований А.Г. Сыркова, поручил члену-корреспонденту Н.Р. Прокопчуку организовать совместные работы по изучению и использованию дисперсных металлов, полученных в СПГУ, в качестве присадок к покрытиям. Тут же был решен вопрос о завершении диссертации Плескуновым И.В. в качестве соискателя БГТУ под руководством профессоров Н.Р. Прокопчука (БГТУ) и А.Г. Сыркова (СПГУ). Дальше события развивались стремительно. В ноябре 2017 г. Плескунов И.В. был оформлен как соискатель кафедры полимерных композиционных материалов БГТУ по специальности «Материаловедение (химическая промышленность)». В те годы в СПГУ специальность «Материаловедение» еще не была аккредитована. По другой возможной специальности «Физическая химия» не было диссертационного совета. Поэтому соискательство Плескунова И.В. в СПГУ было невозможным.

В декабре 2017 г. профессор Прокопчук Н.Р. приезжает в Санкт-Петербург, чтобы прочитать в СПГУ цикл лекций по международной программе «Приглашенный профессор» для студентов и аспирантов Горного университета и на месте познакомиться с исследованиями по поверхностно-наноструктурированным металлам. Чтение лекций и научное общение прошло с большим успехом. Член-корреспондент НАН РБ, профессор Н.Р. Прокопчук, ведущий специалист в РБ по технологии Nanospider, дал согласие, чтобы войти в оргкомитет Международного симпозиума «Нанопфизика и Наноматериалы» (НиН), проводимого в СПГУ с 2003 г., в качестве сопредседателя НиН (см.

рис.). С тех пор докладчики из университетов и академических институтов Беларуси регулярно выступают с интересными работами, в том числе совместными с СПбГУ, на пленарных и секционных заседаниях НиН.



Рис. Иностраный сопредседатель Оргкомитета Международного симпозиума НиН – член-корреспондент НАН РБ Н.Р. Прокопчук (слева) и научный руководитель симпозиума, сопредседатель Оргкомитета А.Г. Сырков (СПГУ)

Под редакцией Сыркова А.Г. и Прокопчука Н.Р. в 2018-2021 г.г. были изданы 4 сборника научных трудов участников симпозиумов НиН-2018, НиН-2019, НиН-2020, НиН-2021. Опубликованы четыре совместные статьи в научных журналах первого и второго квартала [11-14]. В последние годы вышло два учебных пособия Сыркова А.Г. по курсу лекций «Нанотехнология и наноматериалы» под редакцией Н.Р. Прокопчука. В 2019 г. в Беларуси напечатаны две статьи в изданиях ВАК РБ (журналы «Полимерные материалы и технологии» [5] и «Труды БГТУ») Прокопчука Н.Р. и Сыркова А.Г. в соавторстве с Плескуновым И.В. Совместными исследованиями создано новое научное направление – закономерности усиления защитных свойств органополимерных композиций наноалмазными частицами и путем наноструктурированного модифицирования поверхности неорганических присадок [5, 14]. Методики модифицирования органополимерных материалов и поверхности металлов, защиты металлоконструкций от коррозии, отработанные на белорусских производственных площадках, в последние 10-12 лет активно внедряются на российских горно-

металлургических, горно-строительных и перерабатывающих предприятиях [12, 15].

Таким образом, сотрудничество Санкт-Петербургского горного университета в области нанотехнологий с белорусскими горно-химическими предприятиями и с Белорусским государственным технологическим университетом дало возможность получить целый ряд инновационных результатов в области научных исследований, образовательного процесса и внедрения результатов в промышленность России и Беларуси. Эти результаты вносят свой весомый вклад в укрепление Союзного государства и в устойчивое развитие минерально-сырьевого комплекса обеих стран.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нанотрибология: эффект взаимосвязи энергетических характеристик поверхности с антифрикционными и изолирующими свойствами адсорбированных катионных ПАВ / А.Г. Сырков, С.Е. Демьянов, И.В. Плескунов, А.В. Федотов // Записки Горного института. – 2004. – Т.159, Ч.1. – С. 224-228.
2. Методы и эффекты регулирования защитных свойств покрытий на поверхности стали с использованием наноматериалов / А.Г. Сырков, И.В. Плескунов, Е.Н. Кулешов, В.Н. Плескунов, А.А. Кибалко // Записки Горного института. – 2005. – Т.165. – С. 184-187.
3. Опыт разработки и внедрения наноструктурированных покрытий для защиты металлоконструкций на предприятии горной отрасли / А.Г. Сырков, И.В. Плескунов, С.А. Игнатъев, Е.В. Ремзова // Записки Горного института. – 2007. – Т.173. – С. 237-239.
4. Fedotov, A.V. On relation of isolating and antifrictional properties of ionic tensides on metal's surface / A.V. Fedotov, A.G. Syrkov, I.V. Pleskunov // Tsvetnye Metally. – 2005. – N9. – P. 40-44.
5. Влияние железосодержащих наноструктурированных добавок на защитные свойства лакокрасочных покрытий на основе олигомеров / И.В. Плескунов, А.Г. Сырков, Н.Р. Прокопчук, В.Р. Кабиров // Полимерные материалы и технологии. – 2019. – Т. 5, №3. – С. 24-30.
6. Influence of the heteroatomic interaction between metal and nitrogen on tribochemical properties of copper with adsorpted quaternary ammonium compounds / L.V. Makhova, A.G. Syrkov, L.A. Yachmenova, M.M. Brzhezinskaya // Smart Nanocomposites. – 2015. – Vol. 6. – N 1. – P. 39–42.

7. О взаимосвязи гидрофобности покрытий на поверхности и их защитных свойств и о роли наноструктурированных добавок / И.К. Ярцев, В.Н. Плескунов, А.Г. Сырков, М.С. Федосеева // Цветные металлы. – 2005. – №9. – С.36-40.
8. Белоглазов, И.Н. Химико-физические основы и методы получения поверхностно-наноструктурированных металлов / И.Н. Белоглазов, А.Г. Сырков. – СПб.: СПбГУ, 2011. – 72 с.
9. Pleskunov, I. On uniform principles and ways of creation of nanostructured metallic and antifrictional materials on steel base / I. Pleskunov, A. Syrkov, D. Bystrov // CIS Iron and Steel Review. – 2008. – № 1-2. – P. 23–25.
10. Пщелко, Н.С. Электрофизические и химико-физические микро- и нанотехнологии усиления адгезии компонентов в системе металл-диэлектрик / Н.С. Пщелко, А.Г. Сырков, Т.Г. Вахренева // Российские нанотехнологии. – 2009. – Т.4. – № 11-12. – С. 42–47.
11. Slobodov, A.A. Effect of Temperature on Solid-state Hydride Metal Synthesis According of Thermodynamic Modeling / Slobodov A.A., Syrkov A.G., Yachmenova L.A., Kushchenko A.N., Prokopchuk N.R., Kavun V.S. // Journal of Mining Institute. – 2019. – V.239. – P. 550–555.
12. Syrkov, A.G. Dispersed iron obtaining by the method of solid state hydride synthesis and the problem of hydrophobicity of metal / Syrkov A.G., Prokopchuk N.R. // CIS Iron and Steel Review. – 2021. – V.21. – P. 16–22.
13. Syrkov, A.G. Academician N.S. Kurnakov as the founder of physic-chemical analysis – the scientific base for the development of new metal alloys and materials / Syrkov A.G., Prokopchuk N.R., Vorobiev A.G., Brichkin V.N. // Tsvetnye Metally. – 2021. – №1. – P. 77–83.
14. Prokopchuk, N.R. The properties of metal coatings enhanced with diamond nanoparticles / Prokopchuk N.R., Globa A.I., Laptik I.O., Syrkov A.G. // Tsvetnye Metally. – 2021. – №6. – P. 50–54.
15. Сырков, А.Г. Нанотехнология и наноматериалы. Значение и развитие трудов Курнакова и Веймарна / А.Г. Сырков, А.Н. Кущенко, М.О. Силиванов. – СПб.: Политех – Пресс, 2021. – 240 с.