

УДК 669(1+01+04+046.5+018.8+045.5+046.52)+669...8

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАК ОСНОВА СОЗДАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ МЕТАЛЛУРГИИ. ЧАСТЬ 1

**Леонтьев Л.И.<sup>1,2,3</sup>**, академик РАН, советник Президиума РАН, д.т.н., профессор,  
главный научный сотрудник (lleontey@imet.ac.ru; leo@presidium.ras.ru)

**Григорович К.В.<sup>2,3</sup>**, член-корр. РАН, д.т.н., профессор, зав. кафедрой  
«Металлургия стали и ферросплавов», зав. лабораторией (grigorov@imet.ac.ru)

**Костина М.В.<sup>3</sup>**, член-корр. РИА, д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник (mvk@imet.ac.ru)

<sup>1</sup> Президиум РАН

(119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 32а)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

<sup>3</sup> Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

(119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 49)

**Аннотация.** Приведен обзор разработанных учеными Российской академии наук новых металлических и керамических материалов и технологий, в том числе новых: высокопрочные коррозионностойкие азотсодержащие стали; жаропрочные и жаростойкие легкие сплавы и композиты на основе интерметаллидов; модификаторы для колесных сталей; комплексные V-, Cr-, Ni-содержащие ферросплавы, антикоррозионные защитные покрытия на основе ультратонких порошков Zn; каталитические нейтрализаторы отработавших газов автотранспорта; магнитотвердые материалы с высокой температурно-временной стабильностью и механическими характеристиками; наноструктурные стенты для эндоваскулярных операций в щадящем режиме; коррозионно- и износостойкие покрытия и способ их плазменного напыления. Разработаны способы: продольной прокатки с макросдвиговой деформацией для улучшения свойств проката; рециклинга замасленной окалины; контроля разгара огнеупорной футеровки в любой точке горна доменной печи, а также методы контроля чистоты рельсовых сталей по включениям. Разработаны процессы и технологии: спецэлектрометаллургии для получения стали для энергетики; синтеза массивных монокристаллических образцов нитридов переходных металлов, нанопорошков W, Pt, Ti и его карбидов и нитридов; переработки лейкоксеновых концентратов Ярегского месторождения; получения титановых имплантатов с пористыми покрытиями; дробы и порошков черных и цветных металлов; ультратонких порошков Zn; рециклинга отходов металлургического производства с извлечением Zn, Sb, Sn, Fe; получения агломерированных нанокристаллических порошков Ta для конденсаторов; переработки сульфидного Mo-содержащего сырья с получением РЗМ, MoO<sub>3</sub>, CaMoO<sub>4</sub> и утилизацией сернистого газа. Созданы инъекционные установки и технологии их применения, высокопроизводительная установка для плазменного напыления металлов, в том числе на лакокрасочные покрытия, пластмассы, картон. Получены данные о термодинамических функциях реакции растворения кислорода в расплавах на основе Fe и реакциях взаимодействия с кислородом растворенных в них элементов (Cr, Mn, Nb, V, Si, B, C, Ti, Zr, Al).

**Ключевые слова:** новые азотсодержащие стали, сплавы, интерметаллиды, покрытия, технологии, методы контроля, установки, порошки, плазменное напыление, рециклинг отходов, переработка сырья, расплавы.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-11-22

В данной работе показано несколько примеров успешной разработки новых материалов и технологий на основе фундаментальных исследований, проводимых учеными РАН. Эта тема особенно актуальна с учетом принятой стратегии импортозамещения, базирующейся на внедрении отечественных разработок. Теоретические основы разработок, их патентная защищенность изложены в литературе, перечень которой приведен ниже.

В ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН (научная школа академика РАН О.А. Банного и проф., д.т.н. В.М. Блинова) изучены физико-химические основы легирования сталей азотом и разработаны новые марки коррозионно-стойких высокопрочных азотсодержащих сталей, отвечающие современным требованиям по сочетанию высокой прочности с вязкостью, коррозионно- и изно-

состойкостью. Как элемент внедрения, азот обеспечивает высокое твердорастворное упрочнение. В азотистых сталях возможно также дисперсионное твердение за счет выделения наноразмерных нитридов хрома CrN. Легирование азотом вносит вклад в повышение стойкости к локальным видам коррозии. Поскольку азот эффективно стабилизирует аустенит, введение азота в стали позволяет экономить дорогостоящие элементы-стабилизаторы аустенита – Ni, Co, Cu.

В числе прочих новых марок сталей в лаборатории конструкционных сталей и сплавов ИМЕТ РАН разработаны:

- Аустенитная литейная сталь 05X21AГ15N8МФЛ. После гомогенизирующей термической обработки данная сталь превосходит применяющиеся в

России литейные аустенитные стали по пределу текучести в  $\sim 2$  раза, по ударной вязкости в  $\sim 4,5$  раза, по твердости на  $\sim 25\%$  [1, 2]. Рекомендуется для изготовления литой запорной и запорно-регулирующей арматуры (рис. 1) [3].

- Сталь мартенситного класса 05X16H5AB с 4–5 % Ni,  $\sim 0,11$  – 0,17 % N. Сталь высокопрочная, свариваемая, коррозионно- и износостойкая [4 – 6]. Опробована для изготовления:
  - крепежных деталей (рис. 2), способных с успехом заменять аналогичные детали, изготовленные из титановых сплавов типа 6Al4V, BT16, BT35, нержавеющей сталей ЭИ 696М, ВНС-17, ЭИ 961, 07X16H6, 12X18H9Т и др., превосходя их по уровню прочности и более низкой стоимости конечного продукта [4, 6];
  - плоских пружин в составе электрического погружного насоса для добычи нефти и валов насосов, используемых при добыче нефти и газа. Заменяемый материал – сталь 12X18H10Т. Замена обеспечивает повышение ресурса работы пружин в 2 – 3 раза, валов – в 2,8 раз [6];
  - уплотнительных поверхностей запорных узлов криогенной арматуры (взамен стали 03X9K14H6M3Д = ЭП 921). Замена мартенситностареющей стали на азотсодержащую не снижает надежность и долговечность изделий [6]. Сталь 05X16H5AB и рекомендации по ее применению внесены в ГОСТ 5632-2014 от 24.10.2014 «Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки».



Рис. 1. Литые заготовки для высокопрочной коррозионностойкой запорно-регулирующей арматуры из новой стали 05X21AG15N8MFL:

$\sigma_{0,2} = 400$  МПа;  $\sigma_B = 680$  МПа;  $\delta = 37\%$ ;  $\psi = 50\%$ ;  $KCV^{-70} = 1,8$  МДж/м<sup>2</sup>; критическая температура питтингообразования +43 °С (на 28° выше, чем у стали AISI 316)

Fig. 1. Cast billets for high strength corrosion-resistant valves of new 05Kh21AG15N8MFL steel:

$\sigma_{0,2} = 400$  МПа;  $\sigma_B = 680$  МПа;  $\delta = 37\%$ ;  $\psi = 50\%$ ;  $KSV^{-70} = 1.8$  MJ/m<sup>2</sup>; critical pitting temperature +43 °C (by 28° higher than for AISI 316 steel)

Одной из основных причин досрочного вывода из эксплуатации рельсов и вагонных колес являются контактно-усталостные дефекты, связанные с наличием в металле крупных неметаллических включений (в первую очередь с высоким содержанием  $Al_2O_3$ ), являющихся концентраторами напряжений [7] и причиной образования контактно-усталостных дефектов. Поэтому актуальной задачей при повышении эксплуатационного ресурса рельсов и колес является повышение чистоты сталей транспортного назначения по оксидным недеформируемым неметаллическим включениям (НВ). Одним из основных процессов, оказывающих решающее влияние на металлургическое качество стали, является процесс раскисления [8]. Как известно, основной задачей процесса раскисления стали является снижение концентрации общего и растворенного в металле кислорода за счет связывания его в прочные оксиды при вводе в металл раскислителей и удаления образующихся при этом оксидных НВ. Конечное содержание кислорода в металле, состав, морфология и вид размерного распределения НВ в твердом металле определяются применяемыми раскислителями, их составом, количеством, последовательностью и способом введения в расплав [9].

Термодинамическим анализом и экспериментальными исследованиями впервые получены данные о термодинамических функциях реакции растворения кислорода в многокомпонентных расплавах на основе железа и реакциях взаимодействия растворенных в этих расплавах элементов-раскислителей с кислородом: хрома [10 – 12]; марганца [13, 14]; ниобия [15 – 17]; ванадия [18 – 20]; кремния [13, 21, 22]; бора [23]; углерода [24 – 26]; титана [27, 28]; циркония [29, 30]; алюминия



Рис. 2. Болты из высокопрочной (классы прочности 8.8. – 10.9) и коррозионностойкой азотистой стали 05X16H5AB, не склонной к межкристаллитной коррозии, полученные методом холодной высадки на заводском оборудовании (АО «Завод Нормаль», г. Нижний Новгород)

Fig. 2. Bolts of high-strength (strength class 8.8. – 10.9) and nitrous stainless 05Kh16N5AB steel not susceptible to ICC, obtained by cold heading at the plant equipment (JSC “Plant Normal”, Nizhny Novgorod)

[31, 32]. Полученные данные могут быть использованы для оптимизирования существующих и создания новых технологий выплавки сталей и сплавов.

Одним из перспективных путей повышения металлургического качества сталей может являться введение новых модификаторов на основе Ва и Са–Ва лигатур. По отношению к кальцию барий близок по физико-химическим свойствам, но обладает рядом преимуществ с технологической точки зрения. В ходе обработки им металла обеспечиваются условия для эффективного взаимодействия с расплавом. Проведенные промышленные эксперименты по раскислению и модифицированию колесной стали различными вариантами барийсодержащих лигатур показали (рис. 3), что использование модификаторов Sibar®22, Insteel®1.2 и Insteel®1.3 в стальной оболочке в условиях массового металлургического производства приводит к значительному повышению чистоты стали по НВ за счет лучших условий их ассимиляции шлаком [33]. Существенно снижается средний размер оксидных НВ (барий был обнаружен в НВ размером менее 10 мкм, что свидетельствует о достаточно полном удалении крупных НВ из расплава в течение сравнительно короткого времени). Учеными ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН показано, что применение Ва-содержащих лигатур при производстве колесной стали приводит к повышению уровня ударной вязкости при сохранении высокой твердости и прочности. Обработка колесной стали Ва-содержащими модификаторами позволила добиться снижения показателей за-

грязненности металла по всем видам НВ и суммарного брака колес на 69,6 % отн. по сравнению с отчетными данными плавов по действующей технологии за такой же период времени (ОАО «Выксунский металлургический завод»).

В технологиях производства рельсовых, кордовых, трубных сталей и сталей для железнодорожных колес успех в значительной степени обеспечен разработкой методов достижения чистоты сталей по НВ и совершенствованием методик контроля. Широкое признание в практике получили разработанные в ИМЕТ РАН аналитические методики определения содержания и форм присутствия кислорода в сталях и порошках карбидов и нитридов тугоплавких металлов [34]. Разработанные методы контроля чистоты рельсовых сталей по НВ и нормы контроля введены в новый ГОСТ Р 51685-2015 «Рельсы железнодорожные».

Учеными ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН в содружестве с машиностроительным концерном ОРМЕТО-ЮУМЗ, ОАО «ЦНИИТМАШ», Энергомаш-БЗЭМ, НПФ «Ком-терм» РАН была создана инновационная ресурсосберегающая технология спецэлектрометаллургии для получения стали особого назначения (паропроводы острого пара, роторы турбогенераторов атомной и тепловой энергетики, высокостойкие прокатные валки). Технология основана на применении низкой частоты тока, дифференцированных электрических и шлаковых режимах. Она обеспечила повышение физической и химической однородности крупных заготовок до трех раз,

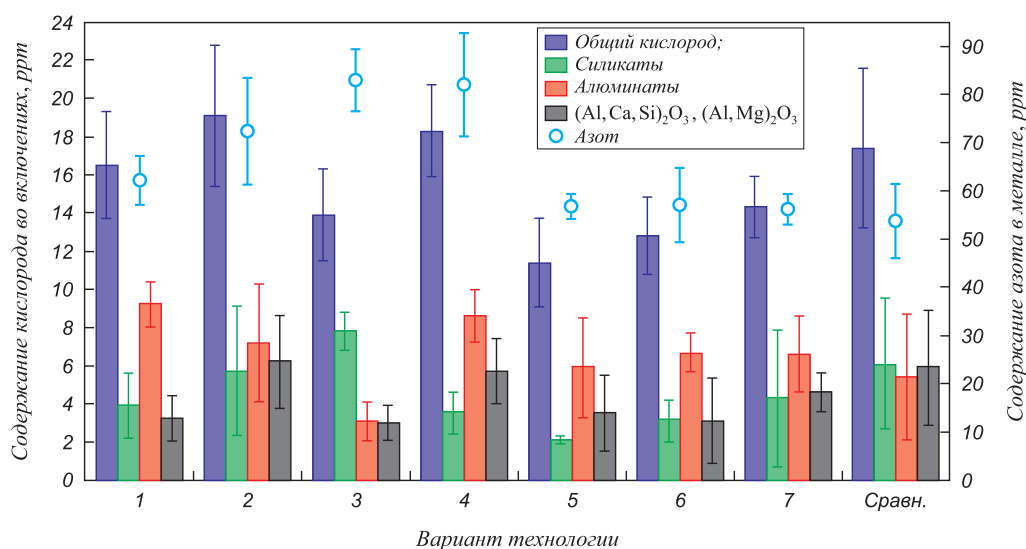


Рис. 3. Сравнение результатов определения фракционного газового анализа кислорода и общего содержания азота в образцах, отобранных из темплетов колесной стали, сгруппированных по вариантам модифицирования:

- 1 – 2 – ввод проволоки Sibar®22 с содержанием бария до 30 % и расходом модификатора 0,58 и 0,83 кг/т соответственно;  
 3 – 4 – ввод модификатора Insteel®1.2 с содержанием бария до 15 % и расходом модификатора 0,43 и 0,62 кг/т соответственно;  
 5 – 7 – ввод модификатора Insteel®1.3 с содержанием бария до 20 % и расходом модификатора 0,52, 0,58 и 0,83 кг/т соответственно

Fig. 3. Comparison of the definition of fractional gas analysis (PHA) of oxygen and total nitrogen in the samples taken from templates of industrial designs of wheel steel, grouped according to the modification types:

- 1 – 2 – input of Sibar®22 wire with barium content of 30 % and modifier consumption – 0.58 and 0.83 kg/t, respectively;  
 3 – 4 – input of Insteel®1.2 modifier with barium content of 15 % and modifier consumption – 0.43 and 0.62 kg/t, respectively;  
 5 – 7 – input of Insteel®1.3 modifier with barium content up to 20 % and modifier consumption – 0.52, 0.58 and 0.83 kg/t, respectively

первичной кристаллической структуры до четырех раз, снижение анизотропии свойств по высоте и сечению заготовок с 2,5 – 3 до 1 – 1,2. Впервые в мире освоено изготовление полых заготовок длиной до 9 м в литом и малодеформированном состоянии для энергетического и атомного машиностроения. Результаты работы позволили ориентировать теплоэнергетику на создание новых энергоблоков с суперсверхкритическими параметрами пара (давление 30 – 35 МПа, температура 600 – 650 °С), что позволит увеличить КПД электростанций на 3,9 %. Работа удостоена премии Правительства РФ в области науки и техники за 2013 г.

На основании исследований взаимодействия плазмы с веществом в ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН разработаны физико-химические и конструктивно-технологические основы процессов плазмохимического синтеза нанопорошков W, Pt, Ti и его карбидов и нитридов, а также плазмохимической технологии переработки лейкоксеновых концентратов Ярегского месторождения [35 – 37].

Учеными ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН в содружестве ФГУП «ВИАМ», ФГУП «ЦНИИЧЕРМЕТ» и рядом авиационных предприятий и двигателестроительных заводов разработаны физико-химические принципы создания конструкционных жаропрочных и жаростойких легких сплавов и композитов на основе легких тугоплавких интерметаллидов, предназначенных для работы при температурах, превышающих не только рабочие температуры (1100 °С), но и температуры плавления (1290 – 1340 °С) жаропрочных никелевых сплавов. Разработаны основы технологических процессов их получения и термической или термопластической обработки, обеспечивающие формирование в изделиях оптимальных структурно-фазовых состояний. Литейные жаропрочные сплавы – естественные композиты на основе  $Ni_3Al$  с направленно закристаллизованной структурой, рабочими температурами до 1250 – 1300 °С и плотностью не выше 7,9 г/см<sup>3</sup>, что на ~15 % ниже плотности никелевых сплавов, которые используются в авиационном двигателестроении [38 – 40]. Порошковые деформируемые теплоустойчивые сплавы системы  $NiAl-Y_2O_3$  с направленно рекристаллизованной структурой (с плотностью 5,9 г/см<sup>3</sup>, что на 30 % ниже, чем у сплавов Ni) предназначены для теплозащиты слабонагруженных деталей (воздухозаборники, корпуса, сопла перспективных гиперзвуковых прямоточных воздушно-реактивных двигателей, передние кромки, обшивка планера, теплозащитные панели аэрокосмических систем многоразового использования) [41, 42].

Методом окислительного конструирования тонкостенной керамики (ОКТК) впервые получены образцы монокристаллических нитридов металлов подгруппы титана, ранее доступные только в виде мелкодисперсных порошков или тонких пленок, изучены физические свойства таких материалов [43 – 45].

Методом ОКТК при взаимодействии азота с монокристаллическим цирконием синтезированы образцы

монокристаллического нитрида циркония. Показана принципиальная возможность получения массивных монокристаллических образцов нитридов переходных металлов без использования затравочных кристаллов соответствующих нитридов. Разработаны также каталитические нейтрализаторы отработавших газов автомобильного транспорта. Налажено опытное производство нейтрализаторов [46 – 48].

В ИМЕТ РАН ведутся работы по разработке и исследованию нового класса магнитотвердых материалов на основе системы железо–хром–кобальт, сочетающих высокие магнитные гистерезисные и механические свойства. Сплавы этого типа поддаются всем видам обработки металлов давлением, а в высокоэригитивном состоянии могут подвергаться лезвийной обработке. По своим прочностным свойствам превосходят все другие магнитотвердые материалы в 8 – 10 раз. В лаборатории пластической деформации металлов проведены комплексные исследования магнитных и механических свойств ряда магнитотвердых Fe–Cr–Co сплавов, позволивших организовать промышленное производство двух марок сплавов (22Х15К и 25Х15КЮБФ) в виде сортового и листового проката на заводе «Электросталь». С участием работников ИМЕТ РАН успешно организовано промышленное производство постоянных магнитов из новых сплавов для изделий ОПК (для системы залпового огня «Смерч», системы «Краснополь» и др.). Созданы магнитотвердые материалы с высокой температурно-временной стабильностью и механическими характеристиками (совместно с ФГУП «ВИАМ», ОАО НПО «Магнетон», ФГУП «Спецмагнит», ОАО НПО «Старт»). Данные материалы позволяют существенно улучшить характеристики систем управления и трехмерной ориентации самолетов и спутников [49 – 52]. В настоящее время ведутся разработки для новых систем высокоточного оружия совместно с Конструкторским бюро приборостроения им. академика А.Г. Шипунова.

Созданы наноструктурные стенты с повышенной биосовместимостью для эндоваскулярных операций, проводимых в щадящем режиме. Проводятся операции в специализированных медицинских центрах (внедрение: Российский онкологический научный центр им. Н.Н. Блохина РАМН, Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева РАМН) [53 – 56].

Совершенствованы научные основы улучшения свойств листового проката за счет макросдвиговой деформации в геликоидальных валках. В ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН разработан способ продольной прокатки с макросдвиговой деформацией, реализуемой специальной профилировкой прокатных валков в виде геликоида. При геликоидальной прокатке к существующей продольной деформации добавляется поперечная, а также деформация растяжения-сжатия частично заменяется на деформацию макросдвига. Поперечная деформация не изменяет размеров готовых полос и исходных заготовок по толщине [57 – 59].



Разработана технология получения титановых имплантатов для тазобедренного сустава с уникальной трехмерной системой наноструктурных капиллярно-пористых покрытий, обеспечивающих быстрое приживание имплантата в организме человека с образованием очень прочной связи имплантата с костью [60 – 62].

Институтом микробиологии (ИНМИ РАН) и ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН в результате совместных исследований была показана перспективность использования углеводородокисляющих микроорганизмов для решения важной практической задачи – рециклинга замасленной окалины. Максимально достигнутая степень очистки замасленной окалины – 94 % [63].

Совместно ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, ИМЕТ УрО РАН, ОАО «Челябинский цинковый завод», Институт экономики УрО РАН разработана технология процессов рециклинга техногенных отходов металлургического производства с извлечением цинка, свинца, олова и железа [64 – 69]. В 2010 – 2013 гг. утилизировано более 100 тыс. т отходов черной и цветной металлургии. При этом ежегодно извлекалось более 10 тыс. т цинка, 4 тыс. т свинца и олова, использовался в черной металлургии железосодержащий клинкер. Среди использованных отходов был цинкосодержащий (15 – 15 %) шлам электропечей ОАО «Северсталь». В промышленных условиях (Объединенная металлургическая компания (ОМК)) показана возможность повышения содержания цинка в пыли электродуговых печей с 10 до 25 – 30 %, что повысит показатели извлечения цинка. Работа удостоена премии Правительства РФ.

Внедрено микролегирование стали бором для повышения конкурентоспособности отечественной металлопродукции (ИМЕТ УрО РАН, ХМИ им. Ж.А. Абишева (Караганда), ИЭ УрО РАН). Для достижения малых концентраций бора в стали предложено вместо ферробора использовать ферросиликобор, ферросиликомарганецбор, что обеспечивает более высокую степень усвоения бора и более высокое качество металла [70, 71].

Разработанные в ИМЕТ УрО РАН коррозионно- и износостойкие покрытия, получаемые методом плазменного напыления, внедрены на следующих предприятиях: «Якутавтотранс» (Якутск); «Тюменьтрансгаз» (Югорск); Завод трансформаторов тока (Екатеринбург); НФП «БИТЭК» (Екатеринбург); Котельно-радиаторный завод (Н. Тагил); ОМК и др. [72 – 74].

Технология и оборудование для получения дроби и порошков черных и цветных металлов внедрена на основании лицензионного договора на предприятии ООО «Инвест-Урал» (Нижний Тагил) (рис. 4).

В ИТЦ «Академический» (Научно-производственный холдинг ВМП, учредитель ИМЕТ УрО РАН) на основе фундаментальных исследований испарения и конденсации металлов созданы технология получения ультратонких порошков цинка и антикоррозионные защитные покрытия на их основе [75, 76]. Покрытия использованы в емкостях и трубопроводах нефтегазового

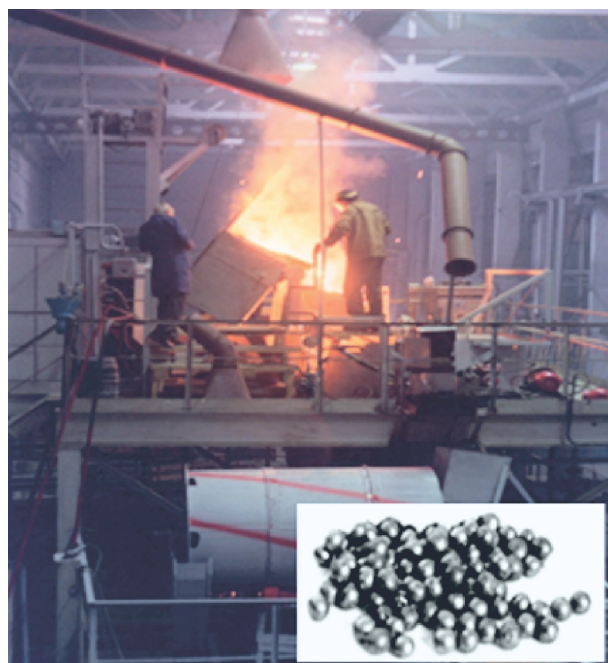


Рис. 4. Технология и оборудование для получения дроби и порошков черных и цветных металлов. ИТЦ «Академический», Научно-производственная фирма «Гран-Мет» (учредитель ИМЕТ УрО РАН)

Fig. 4. Technology and equipment for production of fractions and powders of ferrous and nonferrous metals. Research and Development Center “Academicheskii”, Scientific and Production Company “Grand Met”

комплекса на космодроме Куру (Французская Гвиана) для защиты металлоконструкций стартового комплекса для ракеты-носителя «Союз-СТ», на строительстве объектов инфраструктуры (мосты, путепроводы) зимних Олимпийских игр 2014 г. (Сочи) (рис. 5).

В ИМЕТ УрО РАН разработано аппаратное оформление и программное обеспечение постоянного контроля разгара огнеупорной футеровки в любой точке горна доменной печи [77], что позволяет увеличить кампанию печи до 20 и более лет, не допуская аварийных ситуаций – прорывов жидкого чугуна. Внедрена разработка на ряде доменных печей Китая по заказу китайской стороны [78].

В ИТЦ «Академический» при ИМЕТ УрО РАН создана принципиально новая безотходная технология комплексной переработки сульфидного молибденсодержащего сырья, реализованная на пилотной установке с получением редкоземельных элементов, триоксида молибдена, молибдата кальция и полной утилизацией сернистого газа [79, 80]. Опытные партии триоксида молибдена продаются на сталеплавильные предприятия.

Созданы инжекционные установки и технологии [81, 82]. На предприятия России и ближнего зарубежья продано 15 установок. В 2008 г. сотрудники ИМЕТ УрО РАН и ООО «НТМ» удостоены премии Правительства РФ за создание установок и освоение технологии их применения.



Рис. 5. Производство металлических порошков методом газофазного синтеза и материалов на их основе в ИТЦ «Академический»: а – производство порошка цинка; б – продукция для защиты поверхностей трения на основе бронзового порошка; в – производство цинкнаполненных красок

Fig. 5. Production of metal powders by gas-phase synthesis and materials based on them in Research and Development Center “Academicheskii”: а – production of zinc powder; б – products to protect the friction surfaces on the basis of bronze powder; в – production of zinc-rich paint

В ИМЕТ УрО РАН завершен цикл работ, включающий исследования физико-химических основ и разработку технологии переработки германийсодержащих зол от сжигания углей Павловского месторождения Приморского края, выдачу технологического регламента на проектирование и строительство отделения электроплавки на ООО «Германий и приложения». Начато промышленное производство нового вида германиевого концентрата [83].

Созданы комплексные ванадий-, хром-, никельсодержащие ферросплавы, ферроалюминий и ферросиликоалюминий, составы и технологии получения которых защищены патентами РФ [84, 85]. Все они получены с использованием отходов металлургического производства или нетрадиционных видов сырья малоотходными и экологически безопасными технологиями. Ферроалюминий используется в настоящее время более чем на десяти предприятиях России. Разработчики метода, сотрудники ИМЕТ УрО РАН, отмечены Премией им. В.Е. Грум-Гржимайло УрО РАН.

Институтом металлургии УрО РАН совместно с ООО «Технологии тантала» разработаны технология,

оборудование и получены опытные партии агломерированных нанокристаллических порошков тантала, предназначенных для использования в танталовых конденсаторах. Технические условия на производство импортозамещающих порошков тантала согласованы с производителем электролитических высоковольтных и чип-конденсаторов ОАО «Электонд». Технология защищена двумя патентами РФ [86, 87]. Она позволяет получать нанопорошки других тугоплавких металлов и их карбидов. Показана возможность плакирования порошков и получения композиционных порошков для аддитивных технологий [88, 89].

В настоящее время в ИМЕТ УрО РАН находится в опытной эксплуатации плазменный стенд, на базе которого создается современная промышленная версия плазменной установки «Корвет-6», оборудованной специальной системой подготовки порошков для напыления с возможностью поддержания заданного регламента на сверхзвуковых и гиперзвуковых режимах [90, 91]. Установка предназначена для напыления наружных поверхностей с весовой производительностью до 30 кг/ч (площадь напыления ~150 м<sup>2</sup>/ч). Показана возможность



напыления металлов на лакокрасочные покрытия и даже на органическую основу (пластмассы, картон).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Костина М.В., Мурадян С.О., Хадыев М.С., Корнеев А.А. Исследование влияния термической обработки на структуру, фазовый состав и механические свойства новой литейной высокоазотистой коррозионностойкой Cr – Mn – Ni – Mo – N стали // *Металлы*. 2011. № 5. С. 33 – 48.
- Костина М.В., Мурадян С.О., Терентьев В.Ф. и др. Статическая и циклическая прочность аустенитной коррозионностойкой литейной Cr – Mn – Ni – Mo – N стали // *Металлы*. 2015. № 3. С. 34 – 44.
- Банных О.А., Блинов В.М., Костина М.В. и др. О возможности применения в российском арматуростроении азотистых сталей // *Арматуростроение*. 2014. № 2 (89). С. 63 – 71.
- Банных О.А., Блинов В.М., Костина М.В. и др. Высокопрочная коррозионностойкая азотистая сталь с наноструктурой для крепежных изделий // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2008. № 3. С. 90 – 95.
- Блинов В.М., Калинин Г.Ю., Костина М.В. и др. Влияние азота на коррозионные и коррозионно-механические свойства стали со структурной азотистой мартенсита // *Металлы*. 2003. № 4. С. 84 – 92.
- Костина М.В. Азотистые стали – новые материалы с уникальными свойствами // *Тр. науч.-практ. конф. с междунар. участием и элементами школы для молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР» (1 – 4 октября 2013 г.)*. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. С. 219 – 223.
- Григорович К.В., Гарбер А.К., Шибаев С.С. и др. Совершенствование технологии выплавки рельсовой стали с применением современных методов контроля неметаллических включений // *Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых креплений (по материалам Рельсовой комиссии 2008 г.)*: Сб. науч. докл. – Екатеринбург: ОАО «УИМ», 2009. С. 150 – 168.
- Григорович К.В., Гарбер А.К. Анализ процессов комплексного раскисления расплавов углеродистых сталей // *Металлы*. 2011. № 5. С. 171 – 180.
- Григорович К.В., Шибаева Т.В., Арсенкин А.М. Влияние технологии раскисления трубных сталей на состав и количество неметаллических включений // *Металлы*. 2011. № 5. С. 164 – 170.
- Дашевский В.Я., Григорович К.В., Красовский П.В. и др. Влияние хрома на растворимость кислорода в никеле // *Доклады Академии наук*. 1998. Т. 359. № 2. С. 212 – 213.
- Dashevskii V.Ya., Kanevskii A.G., Makarova N.N. etc. Deoxidation Equilibrium of Chromium in Liquid Iron-Nickel Alloys // *ISIJ International*. 2005. Vol. 45. No. 12. P. 1783 – 1788.
- Александров А.А., Дашевский В.Я., Линчевский Б.В. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Co, содержащих хром // *Металлы*. 2014. № 5. С. 3 – 9.
- Dashevskii V.Ya., Katsnelson A.M., Makarova N.N. etc. Deoxidation Equilibrium of Manganese and Silicon in Liquid Iron-Nickel Alloy // *ISIJ International*. 2003. Vol. 43. No. 10. P. 1487 – 1494.
- Александров А.А., Дашевский В.Я. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Co, содержащих марганец // *Металлы*. 2014. № 1. С. 3 – 11.
- Александров А.А., Дашевский В.Я., Леонтьев Л.И. Растворимость кислорода в расплавах Fe – 40 % Ni, содержащих ниобий // *Доклады Академии наук*. 2013. Т. 452. № 2. С. 172 – 176.
- Александров А.А., Дашевский В.Я., Леонтьев Л.И. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Co, содержащих ниобий // *Доклады Академии наук*. 2015. Т. 464. № 2. С. 180 – 183.
- Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Kanevskii A.G., Leont'ev L.I. Deoxidation of Niobium in the Iron-Nickel Melts // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2015. Vol. 46B. No. 2. P. 220 – 225.
- Дашевский В.Я., Макарова Н.Н., Григорович К.В., Кашин В.И. Термодинамический анализ растворов кислорода в расплавах Fe – Ni, содержащих ванадий // *Металлы*. 1999. № 5. С. 10 – 15.
- Александров А.А., Дашевский В.Я., Леонтьев Л.И. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Co, содержащих ванадий // *Доклады Академии наук*. 2015. Т. 461. № 3. С. 291 – 294.
- Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Kanevskii A.G., Makarov M.A. Deoxidation Equilibrium of Vanadium in the Liquid Iron-Nickel Melts // *ISIJ International*. 2009. Vol. 49. No. 2. P. 149 – 155.
- Дашевский В.Я., Кацнельсон А.М., Макарова Н.Н., Кашин В.И. Термодинамика растворов кислорода в железоникелевых расплавах, содержащих Mn, Si, Al // *Доклады Академии наук*. 1996. Т. 346. № 2. С. 207 – 210.
- Александров А.А., Дашевский В.Я. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Co, содержащих кремний // *Металлы*. 2013. № 6. С. 21 – 25.
- Александров А.А., Дашевский В.Я. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Co, содержащих бор // *Металлы*. 2015. № 5. С. 41 – 51.
- Дашевский В.Я., Лякишев Н.П. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Ni, содержащих углерод // *Доклады Академии наук*. 2005. Т. 405. № 1. С. 1 – 4.
- Katsnelson A.M., Dashevskii V.Ya., Kashin V.I. Carbon activity Fe-, Co-, Ni- and Mn-based melts at 1873 K // *Steel Research*. 1993. No. 4. P. 197–202.
- Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Kanevskii A.G., Makarov M.A. Solubility Oxygen in Carbon-containing Fe-Ni Melts // *Rare Metals*. 2009. Vol. 28. October. Spec. Issue. P. 383–387.
- Дашевский В.Я., Макарова Н.Н., Григорович К.В., Кашин В.И. Термодинамика растворов кислорода в расплавах Fe – Ni, содержащих титан // *Металлы*. 1999. № 2. С. 3 – 11.
- Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Kanevskii A.G., Makarov M.A. Deoxidation Equilibrium of Titanium in the Liquid Iron-Nickel Melts // *ISIJ International*. 2010. Vol. 50. No. 1. P. 44 – 52.
- Дашевский В.Я., Александров А.А., Спрыгин Г.С., Леонтьев Л.И. Растворимость кислорода в расплавах системы Fe – Ni, содержащих цирконий // *Доклады Академии наук*. 2013. Т. 448. № 2. С. 174 – 177.
- Дашевский В.Я., Александров А.А., Леонтьев Л.И. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Co, содержащих цирконий // *Доклады Академии наук*. 2015. Т. 462. № 6. С. 671 – 674.
- Dashevskii V.Ya., Makarova N.N., Grigorovich K.V. etc. Deoxidation Equilibrium of Aluminum and Silicon in the Liquid Iron-Nickel Alloys // *ISIJ International*. 2005. Vol. 45. No. 1. P. 8 – 11.
- Александров А.А., Дашевский В.Я. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Co, содержащих алюминий // *Металлы*. 2014. № 2. С. 16 – 22.
- Григорович К.В., Демин К.Ю., Арсенкин А.М., Гарбер А.К. Перспективы применения барийсодержащих лигатур для раскисления и модифицирования транспортного металла // *Металлы*. 2011. № 5. С. 146 – 156.
- Красовский П.В., Благовещенский Ю.В., Григорович К.В. Определение кислорода в нанопорошках системы W – C – Co // *Неорганические материалы*. 2008. Т. 44. № 8. С. 1 – 6.
- Николаев А.А., Кирпичев Д.Е., Николаев А.В., Цветков Ю.В. Сравнительный анализ металла, полученного при плазменно-дуговом жидкофазном восстановлении титаномагнетита метаном и углеродом // *Черная металлургия*. 2013. Вып. 10. С. 45 – 54.
- Цветков Ю.В., Самохин А.В., Николаев А.В. Плазменные процессы в металлургии и обработке материалов: Сб. ИМЕТ. 2013. С. 512.

37. Цветков Ю.В., Николаев А.А., Николаев А.В., Кирпичев Д.Е. Плазменная обработка рудных материалов сложного минералогического состава как инновационная технология, направленная на решение сырьевой и экологической проблем металлургического производства: Сб. ИМЕТ. 2013. С. 529.
38. Поварова К.Б., Бунтушкин В.П., Казанская Н.К. и др. Особо легкие жаропрочные наноструктурированные сплавы на основе  $Ni_3Al$  для авиационного двигателестроения и энергетического машиностроения // Вопросы материаловедения. 2008. № 2. С. 85 – 93.
39. Поварова К.Б., Дроздов А.А., Базылева О.А. и др. Влияние способа получения монокристаллов сплавов на основе  $Ni_3Al$  на макро- и микрооднородность распределения компонентов, структуру и свойства // Металлы. 2014. № 3. С. 40 – 51.
40. Поварова К.Б., Бондаренко Ю.А., Дроздов А.А. и др. Влияние направленной кристаллизации на структуру и свойства монокристаллов сплава на основе  $Ni_3Al$ , легированного Cr, Mo, W, Ti, Co, Re и P3M // Металлы. 2015. № 1. С. 50 – 58.
41. Povarova K.B., Skachkov O.A. Preparation, structure and properties of  $Ni_3Al$  and  $NiAl$  light powder alloys for aerospace // Materials science forum. Vol. 534 – 536 (2007). P. 1585 – 1588. <http://www.scientific.net>. © (2007) Trans tech publications, Switzerland.
42. Поварова К.Б., Скачков О.А., Дроздов А.А. и др. Механические свойства порошковых сплавов на основе системы  $NiAl - Y_2O_3$ , полученных направленной рекристаллизацией // Металлы. 2014. № 2. С. 44 – 50.
43. Шокодько А.В., Ашмарин А.А., Чернявский А.С. и др. Получение массивных образцов нитридов металлов с применением подхода окислительного конструирования // Перспективные материалы. 2013. № 3. С. 80 – 84.
44. Шокодько А.В., Ашмарин А.А., Чернявский А.С. и др. Получение компактного нитрида ванадия с применением подхода окислительного конструирования и исследование его свойств // Перспективные материалы. 2013. № 1. С. 80 – 84.
45. Кузнецов К.Б. Исследование морфологии нитрида циркония, полученного методом ОКТК: Сб. матер. VII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физикохимия и технология неорганических материалов». – М., 2010. С. 283.
46. Kuznetsov K.B., Shvorneva L.I., Solntsev K.A. Manufacturing and X-ray phase investigation into monolithic nitrides of zirconium and hafnium // Inorganic materials: Applied Research. 2010. Vol. 1. No. 1. P. 35 – 40.
47. Дробаха Е.А., Дробаха Г.С., Солнцев К.А. и др. Фазообразование при термообработке керамических покрытий в системах  $ZrO_2 - CeO_2 - Al_2O_3$ , полученных суспензионным способом на поверхности блочного носителя // Материаловедение. 2011. № 4. С. 25 – 29.
48. Пат. 2502561 РФ. Способ приготовления катализатора для очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания и катализатор, полученный этим способом / Г.С. Дробаха, Е.А. Дробаха, С.А. Дробаха, К.А. Солнцев; заявл. 28. 11. 2012., опубл. 27.12.2013. Бюл. № 36.
49. Устюхин А.С., Алымов М.И., Мияев И.М. Магнитные гистерезисные свойства  $Fe - 26Cr - 16Co$  порошковых магнитотвердых сплавов // Письма о материалах. 2014. Т. 4. № 1. С. 59 – 61.
50. Алымов М.И., Мияев И.М., Сычев А.Е. и др. Механоактивация порошковой шихты магнитотвердого  $Fe - Cr - Co$  сплава // Металлы. 2014. № 4. С. 61 – 67.
51. Пат. 2511136 РФ. Способ термической обработки магнитотвердых сплавов системы железо – хром – кобальт / И.М. Мияев, В.С. Юсупов, Н.В. Лайшева и др.; опубл. 10. 04. 2014. Бюл. № 10.
52. Вомпе Т.А., Мияев И.М., Юсупов В.С. Магнитные свойства магнитотвердых сплавов  $Fe - Cr - 10$  масс. %  $Co$  // Перспективные материалы. 2013. № 4. С. 59 – 63.
53. Заболотный В.Т., Белоусов О.К., Палий Н.А. и др. Материаловедческие аспекты получения, обработки и свойства никелида титана для применения в эндоваскулярной хирургии // Металлы. 2011. № 3. С. 47 – 59.
54. Заболотный В.Т., Колмаков А.Г., Севостьянов М.А., Насакина Е.О. Совершенствование медицинских изделий для эндоваскулярных операций // Интеграл. 2013. № 4(72). С. 42 – 45.
55. Насакина Е.О., Баикин А.С., Севостьянов М.А. и др. Свойства наноструктурного никелида титана и композита на его основе // Химическая технология. 2013. Т. 14. № 1. С. 14 – 23.
56. Sevost'yanov M.A., Fedotov A.Y., Kolmakov A.G. etc. Mechanical properties of nanostructured nitinol/chitosan composite material // Inorganic Materials: Applied Research. 2014. Т. 5. № 4. С. 344 – 346.
57. Карелин Ф.Р., Юсупов В.С., Чопоров В.Ф. и др. Продольная прокатка в геликоидальных валках // Сталь. 2011. № 3. С. 31 – 33.
58. Юсупов В.С., Губанова Н.В., Карелин Ф.Р., Чопоров В.Ф. Исследование процесса прокатки в геликоидальных валках методом математического моделирования в программе Deform 3D 24 // Металлы. 2011. № 2. С. 24 – 30.
59. Карелин Ф.Р., Юсупов В.С., Чопоров В.Ф., Колобов А.В. Разработка и исследование нового способа продольной прокатки в геликоидальных валках // Тр. IX Конгресса прокатчиков (16 – 18 апреля 2013 г.). – Череповец, 2013. С. 106 – 110.
60. Калита В. И., Самохин А.В., Алексеев Н.В. и др. Плазменные керметные покрытия с наноразмерным карбонитридом титана // Физика и химия обработки материалов. 2007. № 2. С. 37 – 45.
61. Калита В.И., Комлев Д.И. Исследование пористых покрытий на внутрикостных имплантатах // Физика и химия обработки материалов. 2008. № 2. С. 48 – 51.
62. Mamaeva V.A., Mamaev A.I., Dorofeeva T.I. etc. Nanostructured bioactive coatings on the titanium implants complex surface to stimulating osteosynthesis // 10 th International conference on modification of materials with particle beams and plasma flows (19 – 24 September 2010). – Tomsk, P. 608 – 611.
63. Борзенков И.А., Журина М.В., Тарасов А.Л. и др. Использование микробного потенциала для очистки замасленной окалины // Прикладная биохимия и микробиология. 2014. № 3. С. 304 – 330.
64. Теплов О.А., Ворopaев И.Г., Дюбанов В.Г., Леонтьев Л.И. Кинетика восстановления электрометаллургического шлама водородом // Металлы. 2007. № 4. С. 11 – 20.
65. Теплов О.А., Леонтьев Л.И., Ворopaев И.Г. и др. Цинксодержащие металлургические шламы: термографическое исследование и разработка технологии утилизации // Сталь. 2008. № 10. С. 123 – 127.
66. Dyubananov V.G., Leontiev L.I. About the problem of recycling of zinc-containing metallurgical slimes // Rare Metals. Vol. 28. Spec. Issue. Oct. 2009. P. 764 – 766.
67. Панышин А.М., Леонтьев Л.И., Козлов П.А. и др. Технология переработки пылей электродуговых печей ОАО «Северсталь» в вельц-комплексе ОАО «Челябинский цинковый завод» // Экология и промышленность России. 2012. Ноябрь. С. 2 – 4.
68. Гудкова И.Ю., Берестов А.С., Лемперт Д.Б. и др. О возможности выделения цинка из металлургических шламов с использованием процесса фильтрационного горения // Химическая физика. 2013. Т. 32. № 4. С. 1 – 9.
69. Пат. 2507280 РФ. Способ переработки цинксодержащих металлургических отходов / П.А. Козлов, А.М. Панышин, Л.И. Леонтьев и др. 2014. Бюл. № 5.
70. Жучков В.И., Сычев А.В., Бабенко А.А. и др. Разработка новых составов и методов получения борсодержащих ферросплавов: Сб. тр. XV Междунар. науч.-практич. конф. – Темиртау, 2013. С. 392 – 396.
71. Степанов А.И., Бабенко А.А., Сычев А.В. и др. Отработка технологии микролегирования стали бором с использованием ферросиликобора // Металлург. № 7. 2014. С. 50 – 52.
72. Ильиных С.А., Кирнос И.В., Крашанинин В.А., Гельчинский Б.Р. Физико-химические свойства покрытий, получаемых дозвуковым и сверхзвуковым плазменным напылением порошков металлов и их композиций // Изв. вуз. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2015. № 1. С. 49 – 54.
73. Гельчинский Б.Р., Ильиных С.А., Крашанинин В.А., Залесова О.Л. Защита металлических изделий, работающих в хими-



- чески агрессивных средах, путем создания комбинированных коррозионностойких покрытий // Тез. Междунар. науч.-технич. конф. «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России» (25 – 28 июня 2012 г.). – М.: ВИАМ, 2012.
74. Ильиных С.А., Гельчинский Б.Р., Крашанин В.А., Залесова О.Л. Комбинированные коррозионно-износостойкие покрытия для защиты изделий от абразивного воздействия в химически агрессивных средах // XXI Всероссийская с международным участием науч.-технич. конф. «Быстрозакаленные материалы и покрытия»: Сб. тр. (27 – 28 ноября 2012 г.). – М., 2012. С. 74 – 78.
  75. Леонтьев Л.И., Залазинский Г.Г., Гельчинский Б.Р. и др. Технологии и оборудование для диспергирования металлов и инъекции материалов // *Металлург.* 2009. № 2. С. 65 – 71.
  76. Золотухина Л.В., Запечалов А.Я., Жидовинова С.В. и др. Влияние ультра- и нанодисперсных порошков цинка и сплавов меди в пластической смазке на структуру и триботехнические свойства стальных поверхностей // *Трение и износ.* 2011. Т. 32. № 2. С. 150 – 156.
  77. Дмитриев А.Н., Чесноков Ю.А., Чэнь К. и др. Система контроля разгара огнеупорной футеровки горна доменной печи // *Сталь.* 2013. № 11. С. 8 – 14.
  78. Dmitriev A.N., Zolotykh M.O., Chesnokov Yu.A. etc. New monitoring system of the refractory lining wear in the blast furnace hearth // *Applied mechanics and materials.* 2014. Vol. 670 – 671. P. 1274 – 1284.
  79. Пат. 2296802 РФ. Способ извлечения молибдена из молибденосодержащего огарка / Г.Н. Кожевников, Ф.Г. Ситдилов, А.Г. Водопьянов; опубл. 10. 04. 2007. Бюл. № 10.
  80. Пат. 2291110 РФ. Способ получения молибдата кальция / Г.Н. Кожевников, Ф.Г. Ситдилов, А.Г. Водопьянов; опубл. 10. 01. 2007. Бюл. № 1.
  81. Лопатин В. Н., Леонтьев Л. И., Жучков В. И. и др. Конструкции и применение пневмотранспортного оборудования в металлургии. – Екатеринбург, 2007. – 170 с.
  82. Сычев А.В., Лопатин В.Н., Жучков В.И. Новое инжекционное оборудование и его применение в металлургии // *Материалы XIV Междунар. науч. конф. «Современные проблемы электрометаллургии стали».* – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2010. С. 68 – 73.
  83. Танутров И.Н., Свиридова М.Н. Научное обоснование, разработка и внедрение пирометаллургической технологии получения германиевых концентратов // *Цветные металлы.* 2014. № 2. С. 71 – 75.
  84. Пат. 2235142 РФ. Способ получения комплексного ванадийсодержащего сплава / О.Ю. Шешуков, В.И. Жучков, С.П. Бурмаков; опубл. 27. 08. 2004.
  85. Пат. 2241058 РФ. Шихта для выплавки ферросиликоалюминия / В.И. Жучков, Л.А. Маршук, Л.И. Леонтьев и др; опубл. 27. 11. 2004.
  86. Пат. 2397279 РФ. Способ получения порошков тугоплавких металлов / В.А.Костылев, Л.И. Леонтьев, В.Л. Лисин, С.А. Петрова; опубл. 20. 08. 2010. Бюл. № 23.
  87. Пат. 93805 РФ. Установка для электрохимического получения порошков тугоплавких металлов / В.А.Костылев, Л.И. Леонтьев, В.Л. Лисин, С.А. Петрова; опубл. 10. 05. 2010.
  88. Вараксин А.В., Лисин В.Л., Костылев В.А. и др. Получение наноразмерных и ультрадисперсных порошков металлов и их карбидов электрохимическим способом // *Бутлеровские сообщения.* 2014. Т. 37. № 1. С. 76 – 83.
  89. Вараксин А.В., Лисин В.Л., Костылев В.А. и др. Получение композиционных порошков, содержащих карбиды металлов // *Бутлеровские сообщения.* 2015. Т. 43. № 8. С. 102 – 110.
  90. Кирнос И.В., Чусов С.А., Ильиных С.А. и др. Разработка и создание экспериментального стенда для сверхзвукового напыления порошковых материалов // *Материалы XIV Междунар. науч.-технич. семинара (24 – 28. 02. 2014 г.). – Свалява – Киев: АТМ Украины, 2014. С. 83 – 86.*
  91. Кирнос И.В., Чусов С.А., Гельчинский Б.Р. Проблемы и перспективы освоения сверхзвукового плазменного напыления композиционных материалов // VII Междунар. симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии (3 – 7 сентября 2014, Плес, Россия): Сб. тр. – Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2014. С. 205 – 206.

Поступила 11 декабря 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 1, pp. 11–22.

## FUNDAMENTAL INVESTIGATIONS AS THE BASIS OF CREATION OF NEW MATERIALS AND TECHNOLOGIES IN METALLURGY. PART 1

**L.I. Leont'ev**<sup>1, 2, 3</sup>, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician, Adviser of Presidium of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher* (lleontev@imet.ac.ru; leo@presidium.ras.ru)

**K.V. Grigorovich**<sup>2, 3</sup>, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory* (grigorov@imet.ac.ru)

**M.V. Kostina**<sup>3</sup>, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of Russian Academy of Engineering, Senior Researcher* (mvk@imet.ac.ru)

<sup>1</sup> Scientific Council on Metallurgy and Metal Science of Russian Academy of Sciences (Department of Chemistry and Material Sciences) (32a, Leninskii ave., Moscow, 119991, Russia)

<sup>2</sup> National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS) (4, Leninskii ave., Moscow, 119049, Russia)

<sup>3</sup> Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences (49, Leninskii ave., 119049, Moscow)

**Abstract.** The article provides an overview developed by the scientists of the Russian Academy of Sciences, on the basis of fundamental re-

search of new metallic and ceramic materials and technologies, including new nitrogen-containing high-strength corrosion-resistant steels, heat-resistant lightweight alloys and composites based on intermetallics; modifiers for wheel steels, complex V-, Cr-, Ni-containing ferroalloys; anti-corrosion protective coatings based on ultrathin Zn powders; catalytic converters of exhaust gases of vehicles; magnetically hard materials with high thermal and temporal stability and mechanical characteristics; nanostructural stents for endovascular operations in a sparing mode; corrosion – and wear-resistant coatings and method of their plasma spraying. The methods were developed for: longitudinal rolling with macroshift deformation (to improve the properties of sheet rolling); recycling of oiled scale; control of the lining deterioration at any point in the blast-furnace hearth. The monitoring methods for the integrity of rail steels by inclusions were carried out. The paper includes the developed processes and technologies of: special electro-metallurgy to produce the steel for the power industry; synthesis of the massive single-crystalline samples of nitrides of transition metals, nanopowders of W, Pt, Ti and Ti carbides and nitrides; processing of Yarega field leucogene concentrates; production of titanium implants with porous coatings; metallic fraction and powders of ferrous and non-ferrous metals; ultrafine Zn powders; recycling of metallurgical wastes with the extraction of Zn, Sb, Sn, Fe; obtaining agglomerated nanocrystalline powders of Ta for capacitors; processing of sulphide

Mo-containing raw materials and obtaining of rare earth metals,  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{CaMoO}_4$  and utilization of sulfur dioxide. The authors described the created injection installations and their application technologies; high-performance system for plasma spraying of metals, including paint coatings, plastics, cardboard. There were obtained the data on thermodynamic functions of the reaction of dissolution of oxygen in Fe-based molts and of the interaction reactions of dissolved in these molts elements (Cr, Mn, Nb, V, Si, B, C, Ti, Zr, Al) with oxygen.

**Keywords:** new nitrogen-containing steel, alloy, coating, technology, control methods, installation, powder, plasma spraying, waste recycling, processing of raw materials, melts.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-1-11-22

## REFERENCES

- Kostina M.V., Muradyan S.O., Khadyev M.S., Korneev A.A. Investigation of the effect of heat treatment on the structure, phase composition and mechanical properties of new corrosion casting high-nitrogen Cr-Mn-Ni-Mo steel. *Metally*. 2011, no. 5, pp. 33–48. (In Russ.).
- Kostina M.V., Muradyan S.O., Terent'ev V.F., Blinov E.V., Prosvirnin D.V. Static and cyclic strength of austenitic corrosion-resistant cast Cr-Ni-Mn-Mo-N steel. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2015, no. 5, pp. 367–375.
- Bannykh O.A., Blinov V.M., Kostina M.V., Blinov E.V., Muradyan S.O. On possibility of the use of nitrogen steel in the Russian valve industry. *Armaturostroenie*, 2014, no. 2(89), pp. 63–71. (In Russ.).
- Bannykh O.A., Blinov V.M., Kostina M.V., Vorob'ev I.A., Muradyan S.O. High-strength corrosion-resistant nitrous steel with nanostructures for fasteners. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*, 2008, no. 3, pp. 90–95. (In Russ.).
- Blinov V.M., Kalinin G.Yu., Kostina M.V., Mushnikova S.Yu., Popov V.I., Khar'kov A.A. Effect of nitrogen on the corrosion and corrosion-mechanical properties of steels with a nitrogen martensite structure. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2003, no. 4, pp. 360–366.
- Kostina M.V. Nitrous steel – new materials with unique properties. In: *Trudy Nauchno-praktich. konf. s mezhdunar. uchastiem i elementami shkoly dlya molodykh uchenykh "Perspektivy razvitiya metallurgii i mashinostroeniya s ispol'zovaniem zavershennykh fundamental'nykh issledovaniy i NIOKR" 1-4.10.2013 g* [Proceedings of Scientific-Practical. Conf. with int. participation and school items for young scientists "Prospects for the Development of Metallurgy and Machine Building with Completed Basic Research and R & D]. Ekaterinburg: OOO "UIPTs", 2013, pp. 219–223. (In Russ.).
- Grigorovich K.V., Garber A.K., Shibaev S.S. etc. Improving the rail steel smelting technology with the use of modern methods of control of non-metallic inclusions. In: *Uluchshenie kachestva i uslovii ekspluatatsii rel'sov i rel'sovykh skreplenii (po materialam Rel'sovoi komissii 2008 g.): Sbornik nauchnykh dokladov* [Improving the quality and conditions of rails and rail fasteners (Materials of Rail Commission 2008): Collection of scientific reports]. Ekaterinburg: OAO "UIM", 2009, pp. 150–168. (In Russ.).
- Grigorovich K.V., Garber A.K. Analysis of the complex deoxidation of carbon steel melts. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2011, no. 9, pp. 934–941.
- Grigorovich K.V., Shibaeva T.V., Arsenkin A.M. Effect of a pipe-steel killing technology on the composition and number of non-metallic inclusions. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2011, no. 9, pp. 927–933.
- Dashevskii V.Ya., Grigorovich K.V., Krasovskii P.V. etc. Effect of chromium on the solubility of oxygen in nickel. *DAN*. 1998, vol. 359, no. 2, pp. 212–213. (In Russ.).
- Dashevskii V.Ya., Kanevskii A.G., Makarova N.N., Grigorovich K.V. etc. Deoxidation Equilibrium of Chromium in Liquid Iron-Nickel Alloys. *ISIJ International*, 2005, vol. 45, no. 12, pp. 1783–1788.
- Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya., Linchevskii B.V. Thermodynamics of the oxygen solutions in chromium-containing melts of the Fe-Co system. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, no. 9, pp. 681–687.
- Dashevskii V.Ya., Katsnelson A.M., Makarova N.N., Grigorovich K.V. etc. Deoxidation Equilibrium of Manganese and Silicon in Liquid Iron-Nickel Alloy. *ISIJ International*. 2003, vol. 43, no. 10, pp. 1487–1494.
- Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya. Thermodynamics of the oxygen solutions in aluminum-containing Fe-Co melts. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, no. 3, pp. 185–190.
- Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya., Leont'ev L.I. Oxygen solubility in a niobium-containing Fe-40 % Ni melt. *Doklady Physical Chemistry*. 2013, vol. 452, no. 1, pp. 205–209.
- Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya., Leont'ev L.I. Thermodynamics of oxygen solutions in niobium-containing Fe-Co melts. *Doklady Physical Chemistry*. 2015, vol. 464, no. 1, pp. 206–209.
- Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Kanevskii A.G., Leont'ev L.I. Deoxidation of Niobium in the Iron-Nickel Melts. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2015, vol. 46B, no. 2, pp. 220–225.
- Dashevskii V.Ya., Makarova N.N., Grigorovich K.V., Kashin V.I. Thermodynamic analysis of oxygen solubility in Fe–Ni melts containing vanadium. *Russian Metallurgy (Metally)*. 1999, no. 5, pp. 9–18.
- Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya., Leont'ev L.I. Thermodynamics of oxygen solutions in vanadium-containing Fe-Co melts. *Doklady Physical Chemistry*. 2015, vol. 461, no. 1, pp. 53–56.
- Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Kanevskii A.G., Makarov M.A. Deoxidation Equilibrium of Vanadium in the Liquid Iron-Nickel Melts. *ISIJ International*. 2009, vol. 49, no. 2, pp. 149–155.
- Dashevskii V.Ya., Katsnel'son A.M., Makarova N.N., Kashin V.I. Thermodynamics of oxygen solutions in Fe–Ni Melts with Mn, Si, Al. *DAN*. 1996, vol. 346, no. 2, pp. 207–210. (In Russ.).
- Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya. Oxygen solubility in silicon-containing Fe–Co melts. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2013, no. 11, pp. 825–829.
- Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya. Thermodynamics of oxygen solutions in alloys of Fe–Co system, containing boron. *Metally*. 2015, no. 5, pp. 41–51. (In Russ.).
- Dashevskii V.Ya., Lyakishev N.P. Thermodynamics of oxygen solutions in carbon-containing Fe–Ni alloys. *Doklady Physical Chemistry*. 2005, vol. 405, no. 1–3, pp. 243–246.
- Katsnelson A.M., Dashevskii V.Ya., Kashin V.I. Carbon activity Fe-, Co-, Ni- and Mn-based Melts at 1873 K. *Steel Research*. 1993, no. 4, pp. 197–202.
- Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Kanevskii A.G., Makarov M.A. Solubility of oxygen in carbon-containing Fe–Ni melts. *Rare Metals*. 2009, vol. 28. October. Spec. Issue. P, pp. 383–387.
- Dashevskii V.Ya., Makarova N.N., Grigorovich K.V., Kashin V.I. Solution of oxygen in Fe–Ni melts containing titanium. *Russian Metallurgy (Metally)*. 1999, no. 1, pp. 1–14.
- Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Kanevskii A.G., Makarov M.A. Deoxidation Equilibrium of Titanium in the Liquid Iron-Nickel Melts. *ISIJ International*. 2010, vol. 50, no. 1, pp. 44–52.
- Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Sprygin G.S., Leont'ev L.I. Oxygen solubility in zirconium-containing melts of the Fe–Ni system. *Doklady Physical Chemistry*. 2013, vol. 448, no. 1, pp. 4–7.
- Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Leont'ev L.I. Thermodynamics of oxygen solutions in the molten zirconium-containing Fe–Co system. *Doklady Physical Chemistry*. 2015, vol. 462, no. 2, pp. 131–134.
- Dashevskii V.Ya., Makarova N.N., Grigorovich K.V. etc. Deoxidation Equilibrium of Aluminum and Silicon in the Liquid Iron-Nickel Alloys. *ISIJ International*. 2005, vol. 45, no. 1, pp. 8–11.
- Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya. Thermodynamics of the oxygen solutions in aluminum-containing Fe–Co melts. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, no. 3, pp. 185–190.
- Grigorovich K.V., Demin K.Yu., Arsenkin A.M., Garber A.K. Prospects of the application of barium-bearing master alloys for the deoxidation and modification of a railroad metal. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2011, no. 9, pp. 912–920.

34. Krasovskii P.V., Blagoveshchenskii Yu.V., Grigorovich K.V. Determination of oxygen in nanopowders of WC-Co system. *Neorganicheskie materialy*. 2008, vol. 44, no. 8, pp. 1–6. (In Russ.)
35. Nikolaev A.A., Kirpichev D.E., Nikolaev A.V., Tsvetkov Yu.V., Comparative analysis of the metal, obtained in plasma-arc liquid-phase reduction of titanomagnetite by methane and carbon. *Byul. Chernaya Metallurgiya*. OAO Chermetinformatiya, 2013, Issue 10, pp. 45–54. (In Russ.)
36. Tsvetkov Yu.V., Samokhin A.V., Nikolaev A.V. Plasma processes in metallurgy and materials processing. In: *Sbornik trudov IMET im. A.A. Baikova RAN*. 2013, pp. 512. (In Russ.)
37. Tsvetkov Yu.V., Nikolaev A.A., Nikolaev A.V., Kirpichev D.E. Plasma processing of ore materials of complex mineralogical composition as an innovative technology aimed at the solution of the raw material and ecological problems of metallurgical production. *Sbornik trudov IMET im. A.A. Baikova RAN*. 2013, pp. 529. (In Russ.)
38. Povarova K.B., Buntushkin V.P., Kazanskaya N.K., Drozdov A.A., Bazyleva O.A. Especially light refractory nanostructured alloys on Ni<sub>3</sub>Al basis for aircraft engines and power engineering. *Voprosy materialovedeniya*. 2008, no. 2, pp. 85–93. (In Russ.)
39. Povarova K.B., Drozdov A.A., Bazyleva O.A., Bondarenko Yu.A., Bulakhtina M.A., Arginbaeva E.G., Antonova A.V., Morozov A.E., Nefedov D.G. Effect of the method of producing Ni<sub>3</sub>Al-based alloy single crystals on the macro- and microhomogeneity of component distribution, structure, and properties. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, no. 5, pp. 382–391.
40. Povarova K.B., Bondarenko Yu.A., Drozdov A.A., Bazyleva O.A., Antonova A.V., Morozov A.E., Arginbaeva E.G. Effect of directional solidification on the structure and properties of Ni<sub>3</sub>Al-based alloy single crystals alloyed with Cr, Mo, W, Ti, Co, Re, and REM. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2015, no. 1, pp. 43–50.
41. Povarova K.B., Skachkov O.A. Preparation, Structure, and Properties of Ni<sub>3</sub>Al and NiAl Light Powder Alloys for Aerospace. *Materials Science Forum*. Vols. 534–536 (2007) pp. 1585–1588. Available at URL: <http://www.scientific.net>. © (2007) Trans Tech Publications, Switzerland.
42. Povarova K.B., Skachkov O.A., Drozdov A.A., Morozov A.E., Pozharov S.I. Mechanical properties of NiAl–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based powdered alloys produced by directional recrystallization. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, no. 3, pp. 210–214.
43. Shokod'ko A.V., Ashmarin A.A., Chernyavskii A.S., Shvorneva L.I., Ogarkov A.I., Konovalov A.A., Solntsev K.A. Preparation of compact vanadium nitride using the oxidative constructing approach and study of its properties. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2013, vol. 4, no. 5, pp. 464–467.
44. Shokod'ko A.V., Ashmarin A.A., Chernyavskii A.S., Shvorneva L.I., Yurkov G.Yu., Solntsev K.A. Production of compact vanadium nitride with oxidative design approach and investigation of its properties. *Perspektivnye materialy*. 2013, no. 1, pp. 80–84. (In Russ.)
45. Kuznetsov K.B. The research of Morphology of zirconium nitride obtained by OKTK. In: *Sbornik materialov VII Rossiiskoi ezhegodnoi konferentsii molodykh nauchnykh sotrudnikov i aspirantov "Fizikokhimiya i tekhnologiya neorganicheskikh materialov"* [Collection of Materials of the VII Annual Conference of the Russian Young Scientists and Graduate Students "Physical chemistry and technology of inorganic materials"]. Moscow: 2010, p. 283 (In Russ.)
46. Kuznetsov K.B., Shvorneva L.I., Solntsev K.A. Manufacturing and X-ray Phase Investigation into Monolithic Nitrides of Zirconium and Hafnium. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2010, vol. 1, no. 1, pp. 35–40.
47. Drobakha E.A., Drobakha G.S., Solntsev K.A., Shvorneva L.I., Kutsev S.V. Phase formation during the heat treatment of ceramic coatings in the systems of ZrO<sub>2</sub>–CeO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, obtained by suspension process on the surface of block carrier. *Materialovedenie*. 2011, no. 4, pp. 25–29. (In Russ.)
48. Drobakha G.S., Drobakha E.A., Drobakha S.A., Solntsev K.A. *Sposob prigotovleniya katalizatora dlya ochestki otrabotavshikh gazov dvigatelei vnutrennego sgoraniya i katalizator, poluchennyi etim sposobom* [Method of preparing catalyst for purification of exhaust gases of combustion engines and catalyst obtained thereof]. Patent RF no. S1 2502561 RU 2013. *Byulleten' izobretenii*. 2013, no. 36. (In Russ.)
49. Ustyukhin A.S., Alymov M.I., Milyaev I.M. Magnetic hysteresis properties of Fe-26Cr-16Co powder magnetic hard alloys. *Pis'ma o materialakh*. 2014, vol. 4, no. 1, pp. 59–61. (In Russ.)
50. Alymov M.I., Milyaev I.M., Sychev A.E., Kovalev D.Yu., Korneev V.P., Morozov Yu.G., Yusupov V.S., Vompe T.A. Mechanical activation of a hard magnetic Fe–Cr–Co alloy powder charge. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, no. 7, pp. 555–560.
51. Milyaev I.M., Yusupov V.S., Laisheva N.V., Milyaev A.I., Ryzhik M.P., Gorokhova L.N., Segal T.A. *Sposob termicheskoi obrabotki magnitoverdykh splavov sistemy zhelezo-khrom-kobalt'* [Heat treatment method of hard-magnetic alloys based on iron-chrome-cobalt system]. Patent RF no. 2511136. *Byulleten' izobretenii*, 2014, no. 10. (In Russ.)
52. Vompe T.A., Milyaev I.M., Yusupov V.S. Magnetic properties of Fe–Cr–10 wt.% Co magnetic hard alloys. *Perspektivnye materialy*. 2013, no. 4, pp. 59–63. (In Russ.)
53. Zabolotnyi V.T., Belousov O.K., Palii N.A., Goncharenko B.A., Armaderova E.A., Sevost'yanov M.A. Materials science aspects of the production, treatment, and properties of titanium nickelide for application in endovascular surgery. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2011, no. 5, pp. 437–448.
54. Zabolotnyi V.T., Kolmakov A.G., Sevost'yanov M.A., Nasakina E.O. Improvement of medical devices for endovascular operations. *Integral*. 2013, no. 4(72), pp. 42–45. (In Russ.)
55. Nasakina E.O., Baikin A.S., Sevost'yanov M.A., Kolmakov A.G., Zabolotnyi V.T., Solntsev K.A. Properties of nanostructured NiTi and composite based on it. *Khimicheskaya tekhnologiya*. 2013, vol. 14, no. 1, pp. 14–23. (In Russ.)
56. Sevost'yanov M.A., Fedotov A.Y., Kolmakov A.G., Zabolotnyi V.T., Barinov S.M., Goncharenko B.A., Komlev V.S., Baikin A.S., Sergienko K.V., Teterina A.Y., Nasakina E.O., Leonova Y.O., Leonov A.V. Mechanical properties of nanostructured nitinol/chitosan composite material. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2014, vol. 5, no. 4, pp. 344–346. (In Russ.)
57. Karelin F.R., Yusupov V.S., Choporov V.F., Gubanova N.V., Saraev D.Yu. Longitudinal rolling at helicoidal rolls. *Stal'*, no. 3, 2011, pp. 31–33. (In Russ.)
58. Gubanova N.V., Karelin F.R., Choporov V.F., Yusupov V.S. Study of rolling in helical rolls by mathematical simulation with the DEFORM 3D software package. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2011, no. 3, pp. 188–193.
59. Karelin F.R., Yusupov V.S., Choporov V.F., Kolobov A.V. Development and research of the new method of rolling at longitudinal helical rolls. In: *Trudy IX Kongressa prokatchikov, 16–18 aprelya 2013* [Papers of the 10th Congress of roller men]. Cherepovets: 2013, pp. 106–110. (In Russ.)
60. Kalita V. I., Samokhin A.V., Alekseev N.V., Yarkin V.V., Lubman G.U., Kasimov A.V., Komlev D.I. Plasma cermet coating with nano-sized titanium carbonitride. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2007, no. 2, pp. 37–45. (In Russ.)
61. Kalita V.I., Komlev D.I. The study of porous coating on the intraosseous implants. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2008, no. 2, pp. 48–51. (In Russ.)
62. Mamaeva V.A., Mamaev A.I., Dorofeeva T.I., Kalita V.I., Komlev D.I., Gnedovets F.G., Malanin D.A., Snigur L.I., and Krainov E.A. Nanostructured Bioactive Coatings on the Titanium Implants Complex Surface to Stimulating Osteosynthesis. *10th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk, Russian 19–24 September 2010*, pp. 608–611.
63. Borzenkov I.A., Zhurina M.V., Tarasov A.L., Belyaev S.S., Dyubanov V.G. Microbial potential for cleaning the oiled iron scale. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2014, vol. 50, no. 5, pp. 273–278.



64. Teplov O.A., Voropaev I.G., Dyubanov V.G., Leont'ev L.I., Hydrogen reduction kinetics of electrometallurgical slime. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2007, no. 4, pp. 268–275.
65. Teplov O.A., Leont'ev L.I., Voropaev I.G., Dyubanov V.G., Korneev V.P. Zinc-containing metallurgical sludges: thermographic research and development of recycling technology. *Stal'*. 2008, no. 10, pp. 123–127. (In Russ.).
66. Dyubanov V.G. and Leontiev L.I., About the problem of recycling of zinc-containing metallurgical slimes. *Rare Metals*, vol. 28, Spec. Issue, Oct. 2009, pp. 764–766.
67. Pan'shin A.M., Leont'ev L.I., Kozlov P.A., Dyubanov V.G., Zatonskii A.V., Ivakin D.A. Technology for processing of EAF dust of OJSC "Severstal" in the Waelz complex of OJSC "Chelyabinsk Zinc Plant". *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2012, no. 11, pp. 2–4. (In Russ.).
68. Gudkova I.Yu., Berestov A.S., Lempert D.B., Dyubanov V.G., Manelis G.B. On the possibility of zinc separation of sludge smelting process using filtration combustion. *Khimicheskaya fizika*. 2013, t. 32, no. 4, pp. 1–9. (In Russ.).
69. Kozlov P.A., Pan'shin A.M., Leont'ev L.I., Zatonskii A.V., Dyubanov V.G., Reshetnikov Yu.V. *Sposob pererabotki tsinksoderzhashchikh metallurgicheskikh otkhodov* [Method for processing of zinc-containing metallurgical waste]. Patent RF no. 2507280. 2014. *Byulleten' izobretenii*, no. 5. (In Russ.).
70. Zhuchkov V.I., Sychev A.V., Babenko A.A., Akberdin A.A., Kim A.S. Development of new compositions and methods for the preparation of boron-containing ferroalloys. In: *Sb. trudov XV mezhd. nauchno-prakticheskoi konferentsii, g. Temirtau, 2013* [Coll. of reports of XV Int. Scientific-practical conference, Temirtau]. pp. 392–396. (In Russ.).
71. Stepanov A.I., Babenko A.A., Sychev A.V., Zhuchkov V.I., Murzin A.V., Dresvyankina L.E., Ushakov M.V. Development of Technology for Microalloying Steel with Boron Using Ferro-Silicon-Boron. *Metallurgist*. 2014, vol. 58, no. 7–8, pp. 588–590.
72. Il'inykh S.A., Kirnos I.V., Krashaninin V.A., Gel'chinskii B.R. Physico-chemical properties of coatings obtained by the method before and supersonic plasma spraying of metal powders and their compositions. *Izvestiya VUZov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2015, no. 1, pp. 49–54. (In Russ.).
73. Gel'chinskii B.R., Il'inykh S.A., Krashaninin V.A., Zalesova O.L. Protection of metal products working in chemically aggressive conditions by creating combined corrosion-resistant coatings. In: *Tezisy mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Novye materialy i tekhnologii glubokoi pererabotki syr'ya – osnova innovatsionnogo razvitiya ekonomiki Rossii" Moskva, VIAM, 25–28 iyunya 2012* [Proceedings of the Int. Scientific Conference "New materials and technologies for deep processing of raw materials - the basis of innovative development of Russian economy"]. (In Russ.).
74. Il'inykh S.A., Gel'chinskii B.R., Krashaninin V.A., Zalesova O.L. Combined corrosion wear-resistant coating to protect the product from abrasive effects in chemically aggressive media. In: *11-ya Vserossiiskaya s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-tehnicheskaya konferentsiya "Bystrozakalennyye materialy i pokrytiya". Moskva. 27–28 noyabrya 2012 goda. Sbornik trudov* [11th All-Russian Scientific Conference with international participation "Rapidly quenched materials and coatings"]. pp. 74–78. (In Russ.).
75. Leont'ev L.I., Zalazinskii G.G., Gel'chinskii B.R., Zhuchkov V.I., Lopatin V.N., Selivanov E.N. Processes and equipment for dispersal of metals and injection of materials. *Metallurgist*. 2009, vol. 53, no. 1–2, pp. 105–113.
76. Zolotukhina L.V., Zapevalov A.Ya., Zhidovinova S.V., Aref'ev I.G., Gel'chinskii B.R. Effect of ultra- and nanopowders of zinc and copper alloys in plastic lubrication on the structure and tribological properties of steel surfaces. *Trenie i iznos*. 2011, vol. 32, no. 2, pp. 150–156. (In Russ.).
77. Dmitriev A.N., Chesnokov Yu.A., Chen' K., Ivanov O.Yu., Zolotykh M.O. Monitoring the wear of the refractory lining in the blast-furnace hearth. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 11, pp. 732–739.
78. Dmitriev A. N., Zolotykh M.O., Chesnokov Yu.A., Chen K., Ivanov O.Yu., Vitkina G.Yu. New Monitoring System of the Refractory Lining Wear in the Blast Furnace Hearth. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vols. 670–671, pp. 1274–1284.
79. Kozhevnikov G.N., Sitdikov F.G., Vodop'yanov A.G. *Sposob izvlecheniya molibdena iz molibdensoderzhashchego ogarka* [Method of extraction of molybdenum from molybdenum-containing cinder]. Patent RF no. 2296802. 2007. *Byulleten' izobretenii*, no. 10. (In Russ.).
80. Kozhevnikov G.N., Sitdikov F.G., Vodop'yanov A.G. *Sposob polucheniya molibdata kal'tsiya* [Method for preparing calcium molybdate]. Patent RF no. 2291110. 2007 *Byulleten' izobretenii*, no. 1. (In Russ.).
81. Lopatin V.N., Leont'ev L.I., Zhuchkov V.I., Sychev A.V., Vinogradov S.V. *Konstruktsii i primeneniye pnevmotransportnogo oborudovaniya v metallurgii* [Design and use of pneumatic conveying equipment in metallurgy]. Ekaterinburg: 2007, 170 p. (In Russ.).
82. Sychev A.V., Lopatin V.N., Zhuchkov V.I. New injection equipment and its application in metallurgy. In: *Sb. tr. Sovremennyye problemy elektrometallurgii stali. Materialy XIV Mezhd. nauch. konf.* [Coll. of reports. Modern problems of steel electrometallurgy. Materials XIV Int. Scientific Conf.]. Chelyabinsk: Izd. tsentr YuUrGU, 2010, pp. 68–73. (In Russ.).
83. Tanutrov I.N., Sviridova M.N. Scientific basis, development and implementation of pirometallurgical technology of obtaining of germanium concentrates. *Tsvetnye metally*. 2014, no. 2, pp. 71–75. (In Russ.).
84. Sheshukov O.Yu., Zhuchkov V.I., Burmasov S.P. *Sposob polucheniya kompleksnogo vanadiisoderzhashchego splava* [Method for production of complex vanadium alloy]. Patent RF no. 2235142, publ.: 27.08.2004 g. (In Russ.).
85. Zhuchkov V.I., Marshuk L.A., Leont'ev L.I. etc. *Shikhta dlya vyplavki ferrosilikoaluminiuma* [Charge for smelting of ferrosilicoaluminum]. Patent RF no. 2241058, publ.: 27.11.2004 g. (In Russ.).
86. Kostylev V.A., Leont'ev L.I., Lisin V.L., Petrova S.A. *Sposob polucheniya poroshkov tugoplavkikh metallov* [Procedure for production of powders of high-melting metals]. Patent RF no. 2397279. 2010. *Byulleten' izobretenii*, no. 23. (In Russ.).
87. Kostylev V.A., Leont'ev L.I., Lisin V.L., Petrova S.A. *Ustanovka dlya elektrokhimicheskogo polucheniya poroshkov tugoplavkikh metallov* [Installation for the electrochemical production of high-melting metal powders]. Patent RF no. 93805, publ.: 10.05.2010. (In Russ.).
88. Varaksin A.V., Lisin V.L., Kostylev V.A., Leont'ev L.I., Zakharov R.G., Petrova S.A. Electrochemical production of nanoscale and ultrafine powders of metals and metal carbides. *Butlerovskie soobshcheniya*. 2014, vol. 37, no. 1, pp. 76–83.
89. Varaksin A.V., Lisin V.L., Kostylev V.A., Leont'ev L.I., Zakharov R.G., Petrova S.A. Production of composite powder containing carbides of metals. *Butlerovskie soobshcheniya*. 2015, vol. 43, no. 8, pp. 102–110. (In Russ.).
90. Kirnos I.V., Chusov S.A., Il'inykh S.A., Gel'chinskii B.R., Krashaninin V.A., Chachin A.I. Design and creation of experimental stand for supersonic spraying of powdered materials. In: *Materialy 14-go Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo seminar, 24–28.02.2014 g., Svalyava* [In: Proceedings of the 14th International Scientific and Technical Seminar, 24–28.02.2014, Svalyava]. Kiev: ATM Ukrainy, 2014, pp. 83–86. (In Russ.).
91. Kirnos I.V., Chusov S.A., Gel'chinskii B.R., Il'inykh S.A., Chachin A.I. Problems and prospects of development of supersonic plasma spraying of composite materials. In: *VII Mezhdunarodnyi simpozium po teoreticheskoi i prikladnoi plazmokhimii (3–7 sentyabrya 2014, g. Ples, Rossiya): sbornik trudov Ivan. Gos. Khim.-tekhkol. un-t.* [In: VII International Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry (3–7 September 2014, Ples, Russia): Coll. of reports]. Ivanovo: 2014, pp. 205–206. (In Russ.).

Received December 11, 2015