

Научная статья
УДК 669.85/.86
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.009

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ МЕТАЛЛУРГИИ РЕДКИХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В АКЦИОНЕРНОМ ОБЩЕСТВЕ «ГИРЕДМЕТ» — ФУНДАМЕНТ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

**Виталий Владимирович Санин¹, Сергей Александрович Мельников²,
Дмитрий Игоревич Смирнов³, Олег Николаевич Будин⁴,
Богдан Дмитриевич Чернышев⁵, Милена Денисовна Панова⁶,
Галина Сергеевна Рыжкова⁷, Максим Владимирович Животворев⁸,
Сергей Федорович Колегов⁹, Екатерина Борисовна Солнцева¹⁰**

^{1–10}Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности (АО «Гиредмет»), Москва, Россия

¹ViVSanin@rosatom.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9983-654X>

²SergeyAleksMelnikov@rosatom.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7117-7668>

³DmIlgSmirnov@rosatom.ru

⁴OINBudin@rosatom.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5219-1468>

⁵BDmChernyshev@rosatom.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4129-3420>

⁶MDPanova@rosatom.ru, <https://orcid.org/0009-0006-2166-9127>

⁷GSRyzhkova@rosatom.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3494-3579>

⁸MVZhivotvorev@rosatom.ru

⁹SeFeKolegov@rosatom.ru, <https://orcid.org/0009-0001-1786-7845>

¹⁰EkBorSolntseva@rosatom.ru, <https://orcid.org/0009-0004-1782-6623>

Аннотация

В статье представлены ключевые технологические направления работ АО «Гиредмет» по решению проблемы обеспечения сырьем (чистыми редкоземельными и редкими металлами) для производства уникальных сплавов. Основанные на научном наследии и инновациях разработки охватывают: глубокую гидрометаллургическую очистку оксидов РЗЭ; производство индивидуальных металлов методами металлотермии и электролиза; переработку техногенных отходов для извлечения ценных компонентов; выплавку широкого спектра сплавов (ВЭС, СВПФ, псевдосплавов, металлгидридов и др.) с использованием ВИП, ВДП и порошковой металлургии.

Ключевые слова:

редкоземельные металлы, РЗМ, редкие металлы, РМ, металлотермия, переработка техногенных отходов, сплавы

Для цитирования:

Совершенствование технологий металлургии редких и редкоземельных металлов и сплавов в акционерном обществе «Гиредмет» — фундамент функциональных материалов нового поколения / В. В. Санин [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 2. С. 56–63. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.009.

Original article

IMPROVING RM, REM AND ALLOY METALLURGY TECHNOLOGIES AT GIREDMET—THE FOUNDATION FOR NEW GENERATION FUNCTIONAL MATERIALS

**Vitaliy V. Sanin¹, Sergey A. Melnikov², Dmitry I. Smirnov³, Oleg N. Budin⁴,
Bogdan D. Chernyshev⁵, Milena D. Panova⁶, Galina S. Ryzhkova⁷, Maksim V. Zhivotvorev⁸,
Sergey F. Kolegov⁹, Ekaterina B. Solntseva¹⁰**

^{1–10}Sazhin Giredmet Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Sazhin Giredmet JSC), Moscow, Russia

¹ViVSanin@rosatom.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9983-654X>

²SergeyAleksMelnikov@rosatom.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7117-7668>

³DmIlgSmirnov@rosatom.ru

⁴OINBudin@rosatom.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5219-1468>

⁵BDmChernyshev@rosatom.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4129-3420>

⁶MDPanova@rosatom.ru, <https://orcid.org/0009-0006-2166-9127>

⁷GSRyzhkova@rosatom.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3494-3579>

⁸MVZhivotvorev@rosatom.ru

⁹SeFeKolegov@rosatom.ru, <https://orcid.org/0009-0001-1786-7845>

¹⁰EkBorSolntseva@rosatom.ru, <https://orcid.org/0009-0004-1782-6623>

Abstract

The article presents key technological directions of Giredmet aimed at solving the problem of securing raw materials (pure rare-earth and rare metals) for the production of unique alloys. Based on scientific heritage and innovations, the developments encompass: deep hydrometallurgical purification of rare-earth element (REE) oxides; production of individual metals via metallothermic methods and electrolysis; processing of technogenic waste to extract valuable components; smelting a wide range of alloys (high-entropy alloys (HEA), high-temperature shape memory alloys (SMA), pseudo-alloys, metal hydrides, etc.) using vacuum induction melting (VIM), vacuum arc remelting (VAR), and powder metallurgy.

Keywords:

rare-earth metals, REMs, rare metals, RMs, metallothermy, technogenic waste recycling, alloys

For citation:

Improving RM, REM and alloy metallurgy technologies at Giredmet—the foundation for new generation functional materials / V. V. Sanin [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 56–63. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.009.

Введение

Современный технологический прогресс, определяющий развитие ключевых отраслей промышленности — от электроники, возобновляемой энергетики и электромобильности до аэрокосмической инженерии, медицины и оборонного комплекса — неразрывно связан с созданием и внедрением функциональных материалов нового поколения. Особую роль в этом играют редкие (РМ) и редкоземельные (РЗМ) металлы, обладающие уникальным комплексом физико-химических свойств (магнитных, люминесцентных, каталитических, электронных и др.), недостижимым для традиционных материалов. Спрос на эти стратегически важные элементы и их сплавы неуклонно растет, предъявляя повышенные требования к чистоте, воспроизводимости свойств и экологической безопасности их производства.

В этом контексте совершенствование технологий металлургии РМ, РЗМ и их сплавов становится критически важным фундаментом для создания инновационных функциональных материалов. Именно глубокие знания и передовые решения в области получения индивидуальных металлов высокой чистоты, синтеза сложных сплавов с заданными характеристиками и эффективной переработки вторичных ресурсов позволяют преодолеть существующие технологические барьеры и обеспечить сырьевую базу для материаловедения будущего.

Акционерное общество «Гиредмет», обладая историческим опытом и компетенциями в области высокотемпературной химии и металлургии, реализует научные разработки полного цикла — от обогащения рудного и техногенного сырья до создания высокомаржинальных продуктов для стратегических отраслей. Настоящая статья посвящена ключевому технологическому переделу в этой цепочке — металлургическим процессам из оксидов РМ и РЗМ в компактные металлы, порошки и целевые сплавы, служащие заготовками для последующего изготовления функциональных устройств нового поколения.

Результаты

Основываясь на богатом наследии (АО «Гиредмет» и АО «ВНИИХТ») и активно развивая инновационные подходы, сегодня АО «Гиредмет» ведет работы по основным технологическим направлениям, связанным с металлургией РМ и РЗМ.

Производство индивидуальных металлов РМ и РЗМ. Развитие металлургических процессов: кальциотермия (Pr, Nd, Ce, Dy, Tb), лантанотермия (Sm, Eu, Yb), литийтермия (Nd, Pr, Dy, Sc), магниетермия и карботермия (Ta), CaH₂-термия (Nb, Ta, Hf, Zr) — для получения компактных металлов и порошков высокой чистоты [1].

Одним из основных направлений применения металлического Pr и Dy является отрасль редкоземельных постоянных магнитов (РЗПМ), в частности для производства перспективных кольцевых магнитов с радиальной текстурой (КМРТ) и используемых для изготовления гироскопов и акселерометров [2; 3]. В качестве исходного сырья выступает оксид празеодима (Pr_6O_{11}) и оксид диспрозия (Dy_2O_3) соответственно, а также оксиды других РЗМ. Технологическая схема получения металлического Pr и Dy заключается в твердофазном спекании оксида с NH_4HF_2 и получением PrF_3 или DyF_3 с последующим кальциотермическим восстановлением до чистых металлов Pr или Dy в защитной атмосфере. После проведения восстановительного процесса Me имеет остаточное загрязнение Ca до 0,2 вес. % (табл. 1). Дополнительный рафинирующий ВД-переплав слитков позволяет достигать чистоты не менее 99,5 вес. %. [1] Химический анализ РЗМ представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав РЗМ-металлов на разных этапах технологии

№	Образец	Содержание, вес. %						
		Pr	Dy	Ca	Nd	Tb	W	Σ прим.
2	Pr-1	Осн.	—	0,16	0,3	—	0,16	1,04
3	Pr-2	Осн.	—	0,07	0,3	—	0,08	<0,5
5	Dy-1	—	Осн.	0,23	—	<0,02	0,08	0,84
6	Dy-2	—	Осн.	0,04	—	<0,02	0,08	<0,2

Примечание. Pr-1 — после процесса восстановления Ca-термией; Pr-2 — после рафинирующего вакуумно-дугового переплава образца Pr-1; Dy-1 — после процесса восстановления Ca-термией; Dy-2 — после рафинирующего вакуумно-дугового переплава образца Dy-2.

Данная технологическая цепочка получения металлических РЗМ (Pr, Dy) (рис. 1) разработана и внедрена. В настоящее время АО «Гиредмет» начал реализацию РЗМ-продукции с перспективой масштабирования технологии.



Рис. 1. Внешний вид образцов Dy: *а* — после процесса восстановления Ca-термией; *б* — после рафинирующего вакуумно-дугового переплава

Самарий (Sm), являющийся основой РЗПМ марок KC25 и KC37 [3], не может быть изготовлен по данной технологии с использованием в качестве восстановителя кальция. Процесс получения самария основывается на взаимодействии его оксида и лантана (мишметалла).

Параллельно разрабатываются и внедряются технологии электролиза оксидно-фторидных расплавов для получения слитков РЗМ. Подавляющая масса легких РЗМ (Nd, Ce, Pr, La) производится методом электролиза оксидов РЗЭ в расплаве электролита $\text{LiF} - \text{RF}_3$: металл выделяется на катоде из тугоплавкого металла. Основываясь на литературных и практических данных, можно сделать вывод, что сегодня электролиз расплавленных солей для производства РЗМ и сплавов на их основе пользуется в мировой практике большой популярностью и почти повсеместно заменяет металлотермию. Высокая производительность электролиза, а тем более перспектива организации непрерывного процесса, выдвигает его на ведущее место среди металлургических способов получения РЗМ и сплавов.

Ведутся научные исследования в области получения лигатур РЗМ — Fe для выплавки сплавов для РЗПМ. Следует отметить, что в процессах металлотермического получения индивидуальных РЗМ на один килограмм металла образуется от 0,8 до 1,1 кг шлаковых отходов. В случае печных и внепечных

методов получения лигатур РЗМ — Fe количество отходов возрастает до 1,5–1,8 кг шлака на 1 кг металла. Это равносильно образованию отходов не менее 2,0 кг на 1 кг РЗМ в лигатуре. Соответственно, остро встают вопросы утилизации шлака, его переработки для уменьшения давления на окружающую среду.

Ведутся активные научные исследования и разработки технологий получения металлических порошков методом гидридно-кальциевого восстановления. Этот метод позволяет синтезировать чистые порошки тугоплавких металлов (Hf, Zr), а также порошки интерметаллидов (NiTi) и сложных сплавов (NiTiHf, ПХ20Н80 и др.) путем восстановления их оксидов гидридом кальция (CaH_2). В качестве примера в табл. 2 представлен химический состав порошков гафния и циркония. Ключевые направления включают оптимизацию параметров процесса (температуры, времени, состава шихты) для контроля размера частиц, удельной поверхности и фазовой чистоты получаемых порошков. Разработки нацелены на создание перспективных материалов для аддитивного производства, высокотемпературных сплавов с памятью формы, жаропрочных композитов и электротехнических сплавов.

Таблица 2

Содержание примесей в порошках гафния и циркония после восстановления

Порошок	Содержание примесей, % мас.								
	Ca	Fe	Mg	Si	Al	Ni	Cr	Mn	Ti
Zr	0,03	0,007	0,0003	<0,0001	<0,0003	0,0015	<0,0003	0,0008	<0,001
Hf	0,04	0,003	0,0002	<0,0001	<0,0003	0,0021	<0,0003	0,0006	<0,001

Производство танталовых порошков в АО «Гиредмет» основано на методах гидрирования-дегидрирования (HDH) и магнито-термического восстановления. Продукция подразделяется на типы согласно областям применения. Например, ведутся исследования по созданию высокочистых танталовых порошков из отечественного сырья (АО «СМЗ», г. Соликамск) для применения в широком диапазоне рабочих напряжений. Значимым результатом стала совместная с АО «ЕЗ ОЦМ» (Верхняя Пышма) работа по изготовлению танталовой ленты. Исходным материалом послужили слитки производства АО «Гиредмет», обработанные электронно-лучевым переплавом (ЭЛП). Слитки ЭЛП характеризовались высокой чистотой: металлические примеси <100 ppm, кислород 140 ppm, углерод 45 ppm. Механические свойства полученной ленты доказали пригодность для производства компактного тантала и проката из него. Это достижение полностью замыкает технологическую цепочку создания различных изделий из российского танталового сырья (рис. 2).

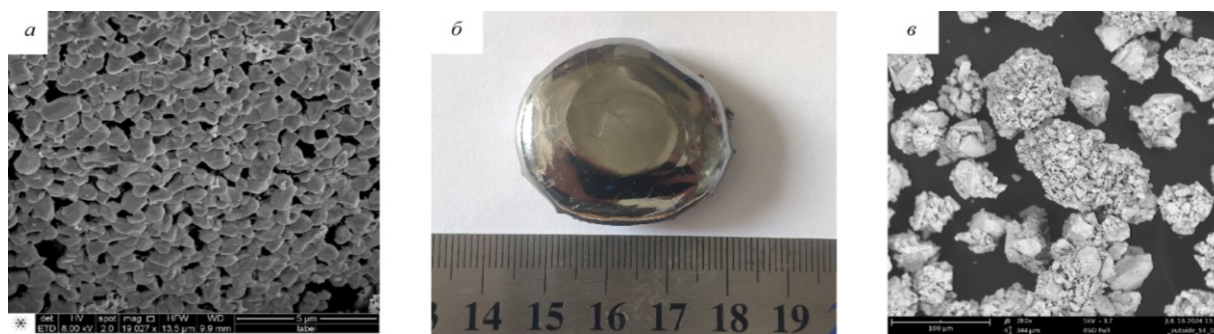


Рис. 2. Микроструктура высокочистого порошка конденсаторного класса (40–120 тыс. мкг/г) (а); слиток для переплава на ЭЛП и последующего проката (б); агломерированные осколочные порошки Та-конденсаторного класса (2,5–6 тыс. мкг/г) (в)

Переработка техногенных отходов. Развиваются технологии переработки техногенного сырья (отходы, шламы, шлаки) с целью извлечения ценных компонентов, включая РЗМ и РМ. Это направление расширяет сырьевую базу и способствует решению экологических задач.

В АО «Гиредмет» ведутся работы по нескольким основным направлениям. Исследуются и разрабатываются процессы гранульной сульфатизации отходов угледобычи с целью получения материала для дальнейшего эффективного извлечения из него микроколичеств Sc и PЗМ с использованием методов агитационного или перколяционного выщелачивания. При выщелачивании обожженных при 300–400 °С гранул было достигнуто максимальное извлечение скандия (73–78 %), извлечение редкоземельных элементов при этом составило: Y — 82–87 %; La — 40–43 %; Ce — 58–66 %. Наилучшие показатели по извлечению редкоземельных элементов (La — 65 %, Ce — 93 %, Y — 96 %) получены в результате выщелачивания гранульного материала, обожженного при 700 °С. При этом наблюдается значительное снижение извлечения железа, алюминия и скандия, вызванное разложением сульфатов названных компонентов с образованием нерастворимых в воде оксидов.

Продолжаются исследовательские работы по оптимизации разработанной технологии переработки шлифотходов производства постоянных магнитов (ПМ) с использованием метода избирательной сульфатизации.

В настоящее время активно ведутся дополнительные исследовательские работы, направленные на дальнейшую оптимизацию разработанной гидрометаллургической технологии переработки шлифовальных отходов (шлифотходов) производства ПМ на основе редкоземельных элементов (РЗЭ), а именно SmCo-типа. В основе данной технологии лежит метод избирательной сульфатизации, принцип действия которого основан на различиях в термодинамической устойчивости и кинетике реакций сульфатообразования целевых РЗЭ (самария) и сопутствующих металлов (кобальта) при контролируемых условиях (температура, парциальное давление SO_2/O_2 , состав газовой фазы, продолжительность обработки).

Предварительные результаты проведенных исследований продемонстрировали высокую эффективность процесса по селективному извлечению самария: так, показатель извлечения $\text{Sm}_2\text{O}_3/\text{Sm}$ в водорастворимую сульфатную форму достиг 96 %. При этом, что подтверждает высокую селективность метода, извлечение кобальта оказалось существенно ниже и составило лишь 17 %, что связано с образованием устойчивых оксидов/шпинелей кобальта (например, CoO , Co_3O_4 , FeCo_2O_4) при выбранных параметрах сульфатизации, обладающих при последующем водном выщелачивании значительно более низкой растворимостью по сравнению с сульфатами самария.

Полученные данные свидетельствуют о высокой степени конверсии целевых РЗЭ-содержащих фаз в шлифотходах (преимущественно оксидов самария) в растворимую форму. Низкое извлечение кобальта является критически важным фактором, так как минимизирует его переход в раствор на стадии выщелачивания, что существенно упрощает последующее разделение и концентрирование самария из раствора (например, методами экстракции или осаждения) и повышает чистоту целевого продукта рециклинга.

Выплавка сплавов. Выплавка целевых сплавов базируется на комплексном применении передовых технологий: вакуумно-индукционной (ВИП) и вакуумно-дуговой (ВДП) плавки, а также методов порошковой металлургии. Эти процессы направлены на создание широкого спектра специализированных материалов с уникальными свойствами. Ниже представлены основные направления, по которым ведутся поисковые научные исследования и разрабатываются и внедряются опытно-промышленные технологии.

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС). Ведутся разработки технологий выплавки (ВИП, ВДП) крупногабаритных слитков ВЭС, включая составы с высоким содержанием тугоплавких металлов (W, Mo, Nb, Ta) [4; 5]. Ключевая задача — достижение высокой химической и структурной гомогенности слитка по всему объему для обеспечения стабильности свойств конечных изделий.

Высокотемпературные сплавы с памятью формы (СВПФ). Разрабатываются технологии вакуумной выплавки (ВИП, ВДП) сплавов на основе NiTi с высоким содержанием активных элементов (Hf, Zr). Приоритеты — обеспечение гомогенности состава по длине слитка/заготовки с точностью до 0,05 вес. % и минимизация загрязнений неметаллическими включениями. Для качественной выплавки данных сплавов ведутся разработки специализированных футеровочных материалов, стойких к расплавам, содержащим активные металлы (рис. 3). Оптимальные составы комбинируют MgO/CaO/BaO-основу с добавками различных тугоплавких и стабилизирующих соединений, в том числе собственного производства.

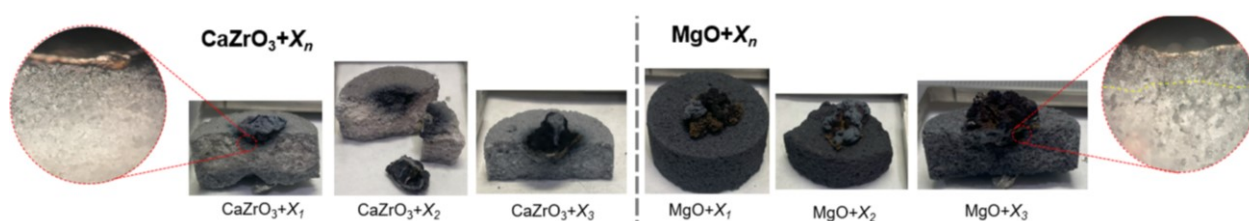


Рис. 3. Исследование взаимодействия расплава NiTi с различными футеровочными материалами

Направление развития *металлогидридных сплавов* для водородной энергетики основано на создании технологий выплавки (ВИП, ВДП) малотонажных партий основных типов гидридообразующих интерметаллидов: АВ (например, TiFe), АВ₂ (например, ZrFe₂), АВ₅ (например, LaNi₅). Ключевые аспекты — контроль стехиометрии и минимизация примесей, негативно влияющих на кинетику и емкость поглощения водорода [6].

Например, ключевым показателем качества АВ-сплава (TiFe) является низкое содержание примесей, особенно кислорода (<500 ppm), поскольку даже незначительные его количества приводят к неконтролируемому образованию оксидных фаз, блокирующих активные центры поглощения водорода и снижающих емкость материала на 20–40 %. Так, для базового сплава FeTi (50/50 % ат.) содержание кислорода в сплаве составило: O₂ = 0,008 % мас., выплавленного при оптимальных режимах в тигле [7; 8]. Для сравнения были проведены плавки при аналогичных условиях, содержание составило: O₂ = 0,23 % мас. для корундового тигля (Al₂O₃ — основа) и O₂ = 0,2 % мас. для графитового тигля. Более подробная информация изложена в статье [7; 8].

Псевдосплавы типа ВНМ/ВНЖ. Ведутся исследования и разработки технологий получения компактных заготовок (прессование + спекание) из псевдосплавов ВНМ/ВНЖ. Цель — создание материалов для использования в атомном приборостроении и промышленности.

Отдельно стоит отметить производство лигатур для модификации металлов в АО «Гиредмет»: номенклатура включает свыше 100 позиций. Выпускаются составы на основе Ni, Co, Al, Cu, Fe, легированные РЗМ и РМ собственного производства, что гарантирует стабильность состава, высочайшее качество и доступность модификаторов для промышленности.

Выводы

Деятельность АО «Гиредмет» в области металлургии РМ и РЗМ, описанная в статье, охватывает критически важный этап полного цикла — преобразование сырья (оксидов, отходов) в готовые металлопродукты (компактные металлы, порошки, сплавы-заготовки). Достигнутые успехи в развитии металлотермии, рециклинга и сплавления обеспечивают получение материалов с уникальными свойствами. Данные разработки служат фундаментом для создания функциональных материалов нового поколения и последующего производства на их основе сложных высококомаржинальных устройств.

Список источников

1. Golev A., Scott M., Erskine P. D. et al. Rare earths supply chains: Current status, constraints and opportunities // Resour. Policy. 2014. Vol. 41. P. 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2014.03.004>.
2. Zhang X., Du Q., Ma S. et al. Pereance Analysis and Calculation of the Double-Radial Rare-Earth Permanent Magnet Voltage-Stabilizing Generation Device // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 23939–23947. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2792448>.
3. Shumkin S. S., Sitnov V. V., Kamynin A. V. et al. Composition and operating properties of hard magnetic materials based on alloys of the Sm-Co-Cu-Fe-Zr system obtained with the use of recoverable resources // Met. Sci. Heat Treat. 2022. Vol. 63, № 9–10. P. 479–485. <https://doi.org/10.1007/s11041-022-00715-y>.
4. Astafurova E., Astafurov E., Luchin A., Gurtova D., Melnikov E., Sanin V. A comparative study of metastability-driven and twinning-assisted hardening in Fe40Mn40Co10Cr10 and FeMnCoCrNi multi-principal element alloys in cold rolling // Mater. Lett. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.137175>.

5. Panov O., Kudryavtsev E. A., Chernichenko R. S., Naumov S. V., Klimenko D. N., Stepanov N. D., Zhrebtsov S. V., Salishchev G. A., Sanin V. V., Pertsev A. S. Excellent strength-ductility combination of interstitial non-equiatomic middle-entropy alloy subjected to cold rotary swaging and post-deformation annealing // *Mater. Sci. Eng. A*. 2024. Vol. 898. P. 146121. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146121>.
6. Fashu S., Lototsky M., Davids M., Pickering L., Linkov V., Tai S., Renheng T., Fangming X., Fursikov P., Tarasov B. A review on crucibles for induction melting of titanium alloys // *Mater. Des.* 2020. Vol. 186. P. 108295. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108295>.
7. Sanin V. V., Shamov I. D., Rzhetskii A. A., Tarasov B. P., Lototsky M. V., Melnikov S. A. Features of metallurgy of titanium hydride-forming alloys // *High Energy Chem.* 2024. Vol. 58, Suppl. 4. P. S492–S502. <https://doi.org/10.1134/S0018143924701571>.
8. Tarasov B. P., Shamov I. D., Melnikov S. A., Sanin V. V., Lototsky M. V. Influence of the preparation routes on chemical and phase composition and hydrogen sorption performances of hydrogen storage alloys based on TiFe intermetallic // *High Energy Chem.* 2024. Vol. 58, Suppl. 4. P. S539–S548. <https://doi.org/10.1134/S0018143924701613>.

References

1. Golev A., Scott M., Erskine P. D. et al. Rare earths supply chains: Current status, constraints and opportunities. *Resour. Policy*, 2014, Vol. 41, pp. 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2014.03.004>.
2. Zhang X., Du Q., Ma S. et al. Pereance Analysis and Calculation of the Double-Radial Rare-Earth Permanent Magnet Voltage-Stabilizing Generation Device. *IEEE Access*, 2018, Vol. 6, pp. 23939–23947. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2792448>.
3. Shumkin S. S., Sitnov V. V., Kamynin A. V. et al. Composition and operating properties of hard magnetic materials based on alloys of the Sm-Co-Cu-Fe-Zr system obtained with the use of recoverable resources. *Met. Sci. Heat Treat.*, 2022, Vol. 63, no. 9–10, pp. 479–485. <https://doi.org/10.1007/s11041-022-00715-y>.
4. Astafurova E., Astafurov E., Luchin A., Gurtova D., Melnikov E., Sanin V. A comparative study of metastability-driven and twinning-assisted hardening in Fe₄₀Mn₄₀Co₁₀Cr₁₀ and FeMnCoCrNi multi-principal element alloys in cold rolling. *Mater. Lett.*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.137175>.
5. Panov O., Kudryavtsev E. A., Chernichenko R. S., Naumov S. V., Klimenko D. N., Stepanov N. D., Zhrebtsov S. V., Salishchev G. A., Sanin V. V., Pertsev A. S. Excellent strength-ductility combination of interstitial non-equiatomic middle-entropy alloy subjected to cold rotary swaging and post-deformation annealing. *Mater. Sci. Eng. A*, 2024, Vol. 898, p. 146121. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146121>.
6. Fashu S., Lototsky M., Davids M., Pickering L., Linkov V., Tai S., Renheng T., Fangming X., Fursikov P., Tarasov B. A review on crucibles for induction melting of titanium alloys. *Mater. Des.*, 2020, Vol. 186, p. 108295. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108295>.
7. Sanin V. V., Shamov I. D., Rzhetskii A. A., Tarasov B. P., Lototsky M. V., Melnikov S. A. Features of metallurgy of titanium hydride-forming alloys. *High Energy Chem.*, 2024, Vol. 58, Suppl. 4, pp. S492–S502. <https://doi.org/10.1134/S0018143924701571>.
8. Tarasov B. P., Shamov I. D., Melnikov S. A., Sanin V. V., Lototsky M. V. Influence of the preparation routes on chemical and phase composition and hydrogen sorption performances of hydrogen storage alloys based on TiFe intermetallic. *High Energy Chem.*, 2024, Vol. 58, Suppl. 4, pp. S539–S548. <https://doi.org/10.1134/S0018143924701613>.

Информация об авторах

В. В. Санин — кандидат технических наук, начальник лаборатории металлургических процессов;

С. А. Мельников — кандидат физико-математических наук, научный руководитель лаборатории металлургических процессов;

Д. И. Смирнов — кандидат технических наук, начальник лаборатории переработки техногенного сырья;

О. Н. Будин — начальник лаборатории технологии получения редких, редкоземельных металлов, порошков и сплавов;

Б. Д. Чернышев — научный сотрудник;

М. Д. Панова — младший научный сотрудник;

Г. С. Рыжкова — научный сотрудник;

М. В. Животворев — научный сотрудник;

С. Ф. Колегов — старший научный сотрудник;

Е. Б. Солнцева — руководитель направления.

Information about the authors

V. V. Sanin — PhD (Engineering), Head of the Metallurgical Processes Laboratory;
S. A. Melnikov — PhD (Physical & Mathematics), Scientific Supervisor of the Metallurgical Processes Laboratory;
D. I. Smirnov — PhD (Engineering), Head of the Technogenic Raw Materials Processing Laboratory;
O. N. Budin — Head of the Laboratory of Technology for Producing Rare, Rare-Earth Metals, Powders, and Alloys;
B. D. Chernyshev — Researcher;
M. D. Panova — Research Assistant;
G. S. Ryzhkova — Researcher;
M. V. Zhivotvorev — Researcher;
S. F. Kolegov — Senior Researcher;
E. B. Solntseva — Head of Research Direction.

Статья поступила в редакцию 26.06.2025; одобрена после рецензирования 17.07.2025; принята к публикации 31.07.2025
The article was submitted 26.06.2025; approved after reviewing 17.07.2025; accepted for publication 31.07.2025.