

УДК 546.65: 339.13: 669.15-198

## АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ РОССИИ И МИРА

**Волков А.И.<sup>1</sup>**, к.х.н., зам. директора научного центра НЦМТ (rhenium@list.ru)

**Стулов П.Е.<sup>1</sup>**, младший научный сотрудник (pavel1411@rambler.ru)

**Леонтьев Л.И.<sup>1,2,3,4</sup>**, академик РАН, советник, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник

**Углов В.А.<sup>1</sup>**, к.т.н., заместитель генерального директора

<sup>1</sup>Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина

(Россия, 105005, Москва, ул. Радио, 23/9, стр. 2)

<sup>2</sup>Институт металлургии УрО РАН

(620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

<sup>3</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

(119049, Россия, Москва, Ленинский проспект, 4)

<sup>4</sup>Президиум РАН

(119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, 32а)

**Аннотация.** Проведен анализ современного состояния производства редкоземельных металлов (РЗМ) в России и в мире. Приведены сведения о выпуске РЗМ в разных странах мира и о новых зарубежных проектах по добыче и переработке РЗМ. Представлен баланс производства, экспорта и импорта сырья и продукции с РЗМ, в том числе по скандию и иттрию, в России. Рассчитан максимальный объем потребления РЗМ в России с учетом импортируемой продукции с РЗМ. Эти данные сравниваются с другими странами, в том числе с бывшим СССР. Большое внимание уделено применению РЗМ в металлургии. Приведены данные о влиянии РЗМ на свойства чугуна и стали. Даны сведения о применяемых формах РЗМ для их использования в черной металлургии России. Изучена структура потребления РЗМ по отраслям черной и цветной металлургии. На примере двух предприятий (одно из них специализируется на массовом производстве, а второе – на специальных сталях) изучена структура потребления РЗМ для легирования стали по типам и сферам ее применения. Исследованы особенности развития потребления РЗМ в черной металлургии России, рассчитан объем потребления, приведены данные об импорте сырьевых материалов с РЗМ для металлургии, даны сведения о производителях ферросплавов с РЗМ в России. Проанализирован спектр продукции черной металлургии с РЗМ. Проведено сравнение потребления РЗМ в металлургии России и зарубежных стран. Рассмотрены причины недостаточного потребления РЗМ в металлургии России, дана оценка по изменению объемов производства отдельных типов стали и чугуна, выработаны рекомендации по росту потребления РЗМ в металлургии.

**Ключевые слова:** редкоземельные металлы, РЗМ, ферросплавы, лигатуры, модификаторы, чугун, сталь, анализ рынка, баланс производства и потребления, черная металлургия.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-405-418

### ВВЕДЕНИЕ

К редкоземельным металлам (РЗМ) относят элементы III(Б) группы Периодической системы Д.И. Менделеева: Sc, Y, La и лантаноиды (Ce – Lu). Редкоземельные металлы относят к так называемым «редким металлам» – исторически сложившейся в начале XX в. группе элементов, когда они только начинали использоваться (редко потреблялись), включающей, кроме РЗМ, еще четыре группы – рассеянные, тугоплавкие, легкие и радиоактивные элементы [1]. В настоящее время наблюдается путаница с терминами «редкие» и «редкоземельные» металлы, часто можно даже встретить такое выражение, как «редкие и редкоземельные металлы».

Редкоземельные металлы применяют в различных отраслях промышленности (радиоэлектронике, приборо- и машиностроении, металлургии, химической, стекольной и керамической промышленности и др.).

Их используют в производстве постоянных магнитов, катализаторов для крекинга нефти, синтеза каучука, люминофоров, порошков для полировки линз и микроципов. Уровень потребления РЗМ в мире растет благодаря развитию «зеленой» энергетики. Сферы применения РЗМ и существующие технологии их переработки рассмотрены в работах [2, 3]. В 2018 г. объем мирового производства РЗМ составил 201 тыс. т [4], из них 174 тыс. т приходится на Китай, являющийся не только главным поставщиком, но и основным потребителем РЗМ. В 2019 г. мировая добыча РЗМ составила уже 210 тыс. т в пересчете на оксиды [5], с учетом таких стран, как Китай, США, Бирма, Австралия, Индия, Россия, Мадагаскар, Тайланд, Бразилия, Вьетнам, Бурунди (указаны в порядке убывания объема добычи).

Всплеск интереса к РЗМ вызвали попытки Китая управлять ценами на мировом рынке РЗМ, в 2011 – 2012 гг. был ограничен экспорт и резко повышены цены на РЗМ. Это привело к рождению про-

ектов и даже государственных программ других стран по добыче и переработке РЗМ [6, 7], в том числе в России [8]. Резко возросло число научных публикаций на тему РЗМ. Обсуждались вопросы использования вторичных ресурсов с РЗМ [6, 9 – 11]. Реализация таких проектов оказалась сложной задачей. Через несколько лет цены вернулись на прежний уровень [12]. В 2012 г. на Mountain Pass (Molycorp) была возобновлена добыча РЗМ (5 – 6 тыс. т в год), концентрат поставлялся на эстонский завод Silmet. Выйти на прибыль этому проекту не удалось, в 2015 г. добыча сырья была прекращена. В 2016 г. Molycorp избегает банкротства смежной собственника и переименовывается в Neo Performance Materials. С 2018 г. добыча редкоземельной руды в Mountain Pass снова возобновлена, и в 2019 г. добыто уже 26 тыс. т бастнезита, что сделало США крупнейшим производителем концентратов РЗМ за пределами Китая [5]. С 2013 г. индийская компания Indian Rare Earth Ltd (IREL) начала эксплуатацию завода по переработке монацита в Ориссе. Объем производства составляет около 2000 т РЗМ в год. Австралийская компания Lynas в 2013 г. отложила планы по разработке нового месторождения Dupcan из-за низких цен на продукцию. Новый перерабатывающий завод в Малайзии (с 2014 г. – 22 тыс. т в год) так и не смог достичь выхода на проектную мощность. В 2018 – 2019 гг. компания Lynas стала получать прибыль. Сегодня это единственная компания с полным циклом производства РЗМ за пределами Китая. Бразильская компания CBMM с 2015 г. начала выпускать РЗМ по 1 тыс. т ежегодно. Подробнее о проектах РЗМ в других странах изложено в работе [13]. В результате реализации этих проектов доля Китая в добыче РЗМ снизилась с 97 % в 2010 г. [10] до 63 % в 2019 г. [5]. Однако в этих данных не учитывается нелегальная продукция и высокая доля участия Китая в зарубежных проектах, в том числе в собственности и сбыте продукции.

В России в рамках подпрограммы «Развитие промышленности редких и редкоземельных металлов» государственной программы «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» в 2013 – 2018 гг. проведено 40 НИОКР на условиях государственно-частного партнерства. В рамках этих работ получены новые материалы и технологии с РЗМ. В настоящее время Минпромторг России разработал проект «Стратегии развития промышленности редких и редкоземельных металлов Российской Федерации на период до 2035 года». В то же время план реализации стратегии предусмотрен в рамках продуктового направления «Редкие и редкоземельные металлы» Дорожной карты развития в Российской Федерации высокотехнологичной области «Технологии новых материалов и веществ», разработанной в целях реализации Соглашения о намерениях от 10.07.2019 г. между Правительством РФ и Государственной Корпорацией по атомной энергии «Росатом».

Черная металлургия является одним из основных потребителей редких металлов [14]. ГНЦ ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина» совместно с промышленными предприятиями разработана «Межотраслевая программа работ по освоению новых видов продукции металлургии с использованием редких и редкоземельных металлов на период 2020 – 2035 гг.». Основной ее целью является развитие производства и импортозамещение высококачественных металлических сплавов и сталей с использованием редких металлов (РМ) с существенным увеличением доли качественных сталей, в том числе конструкционных, коррозионностойких, инструментальных, нержавеющей, жаропрочных сталей и сплавов для авиа- и ракетно-космической отрасли, приборо- и станкостроения, химического и тяжелого машиностроения, медицинской промышленности и т. д.

Для реализации описанных программ важно оценить количество потребляемых РЗМ в черной металлургии, виды производимых сплавов с РЗМ, формы потребляемых РЗМ, оценить перспективы и пути развития производства чугуна и стали с РЗМ.

#### **Производство и потребление РЗМ в России**

В России добычу руд с РЗМ осуществляют в Мурманской области. Едва ли не единственным значимым источником РЗМ до сих пор является Ловозерское месторождение (1,12 % РЗМ в руде). На одноименном ГОКе производят лопаритовый концентрат, перерабатываемый по хлорной технологии на Соликамском магниевом заводе (СМЗ) с получением коллективного концентрата карбонатов РЗМ. При производственной мощности 3600 т в год РЗМ в пересчете на оксиды в 2018 г. объем производства составил 2595,7 т РЗМ, из них 2549,8 т отправлено на экспорт [4]. Остальное количество коллективного концентрата СМЗ было переработано подмосковной компанией ООО «Лаборатория инновационных технологий» (ГК «Скайград») на автоматизированном каскаде центробежных экстракторов собственной конструкции [15, 16]. Опытное промышленное производство мощностью 140 т в год было запущено в 2018 г. в Королеве. Компания производит оксид и карбонат церия, оксиды лантана, неодима, раствор лантана, карбонат среднетяжелых РЗМ, металлические неодим и самарий. Компания планирует реализовать проект по выделению РЗМ из фосфогипса (до 50 тыс. т на начальном этапе и далее до 300 тыс. т в год по сырью), а также создать разделительное производство в г. Пересвет с объемом переработки до 2000 т по сырью в год с получением, наряду с легкими РЗМ, оксида иттрия и оксидов среднетяжелых РЗМ – самария, гадолиния, европия и диспрозия. Небольшое количество (до 70 т) коллективного концентрата СМЗ периодически перерабатывается на Чепецком механическом заводе с получением концентрата оксидов РЗМ

и полирующих порошков. Там же на опытно-промышленной установке обрабатывается азотнокислая технология переработки лопаритового концентрата.

Месторождения апатит-нефелиновых руд (0,24 – 0,42 % РЗМ) разрабатывают с получением апатитовых концентратов и далее – фосфорных удобрений. Редкоземельные металлы при этом почти не извлекают. Они в значительной степени остаются в фосфогипсе – крупнотоннажном отходе производства, а также частично концентрируются в получаемой фосфорной кислоте и удобрениях. Таким образом, ежегодно с перерабатываемым сырьем в России теряется количество РЗМ, сопоставимое с половиной мировой добычи (122 тыс. т). Лишь в 2016 г. ПАО «Акрон» запустило производство мощностью до 200 т в год по разделению РЗМ из апатитового концентрата месторождения «Олений ручей» [17]. Среди выпускаемой продукции – оксиды лантана, церия, дидима (так называют смесь неодима и празеодима) и неодима, карбонаты лантана, церия и дидима, концентраты карбонатов РЗМ, легких РЗМ, среднетяжелых РЗМ, азотнокислый раствор РЗМ. Созданная в ОАО «Фосагро-Череповец» установка по извлечению из экстракционной фосфорной кислоты и групповому разделению РЗМ мощностью 12 т в год в настоящее время законсервирована [2]. В 2016 г. ОАО «Уралхим» запускало пилотную установку по извлечению РЗМ из фосфогипса.

До недавних пор основным производителем соединений и лигатур со скандием был Гидрометаллургический завод (ООО «Интермикс Мет», г. Лермонтов). Он в 2013 г. организовал опытную установку для получения скандиевого концентрата на предприятии АО «Далур» (Урановый холдинг «Атомредметзолото»). Для этого был реализован проект попутного извлечения скандия из продуктивных растворов уранодобывающего предприятия [18]. Тот же Гидрометаллургический завод на ПАО «ВСМПО-АВИСМА» в 2015 г. создал производственную установку извлечения скандия из отходов производства тетрахлорида титана. На самом ООО «Интермикс Мет» из полученных концентратов производили  $\text{Sc}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ScF}_3$ ,  $\text{ScCl}_3$ , Al – Sc-лигатуру и металлический скандий. В конце 2017 г. завод был остановлен, через год снова запущен. В настоящее время завод сменил собственников, проходит реорганизацию, перспективы производства скандия на нем не определенные. Проект на АО «Далур» развивается отдельно. С 2017 г. на опытно-промышленной установке начато производство оксида скандия. В 2016 г. на Уральском алюминиевом заводе запущен опытный участок и получена опытная партия 99 %  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  из красных шламов. Из-за проблем с реализацией продукции в 2018 г. проект был заморожен. Планы реализации проекта китайской компании Shewu Technology Group Corp. переработки красных шламов с извлечением  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  на Богословском алюминиевом заводе, а также проекта переработки отходов производства диоксида титана «Крымского тита-

на» с получением скандия [19] не были реализованы. Объем импортных поставок  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  и  $\text{Y}_2\text{O}_3$  составляет около 15 т.

При запасах РЗМ около 20 % мировых Россия добывает и перерабатывает всего около 1 % [20]. Зарубежные источники оценивают долю запасов России ниже: 10 % [5] и 13,6 % [21]. На рис. 1 представлен баланс производства и потребления РЗМ в России в 2018 г., при его составлении обобщены вышеперечисленные данные. Основная часть производимых в России РЗМ представлена коллективным концентратом карбонатов РЗМ. Всего 5,6 % производимых РЗМ разделяют с получением соединений индивидуальных «легких» РЗМ, при этом соединения «тяжелых» РЗМ не производят, т. е. недавно созданные мощности по разделению РЗМ (около 350 т в год) загружены лишь наполовину. До 95 % производимых в России РЗМ отправляют за рубеж, где проводят разделение. В результате импорта Россия ежегодно получает около 1000 т оксидов РЗМ (разделенных и частично разделенных) и около 100 т РЗМ в год в виде металлов и сплавов. Можно констатировать, что в России слабо развито производство продукции с РЗМ глубокой степени переработки, экспортируется полуфабрикат, а импортируется переработанная продукция, в том числе разделенные РЗМ. По расчетам авторов, ежегодно для получения компонентов электроники, катализаторов нефтепереработки, постоянных магнитов, стекла, оптических компонентов, полировальных порошков, огнеупорной керамики, лигатур и модификаторов Россия потребляет 1230 т РЗМ в год. В составе аналогичной импортной продукции ежегодно поставляется еще около 2000 т РЗМ.

Сравним эти цифры с мировыми лидерами отрасли РЗМ. В 1990 г. СССР производил 8500 т РЗМ в продукции при экспорте 14 % [22], из них 20 – 25 % индивидуальных РЗМ, а потребление внутри страны не превышало 6000 т [23]. В 1990 г. США добывали 22 713 т, импортировали 4990 т смеси РЗМ, 151 т оксидов РЗМ, 1363 т металлических РЗМ, 199 т Sc и Y, 93 т ферроцерия, экспортировали 1730 т соединений церия, 241 т Sc и Y, 18 т ферроцерия, видимое потребление – 30 000 т [24], а всего в мире тогда производили 53 000 т РЗМ [25]. В 2008 г. США потребляли 20 663 т РЗМ, Япония 34 330 т, страны ЕС 23 013 т [26]. В 2009 г. потребление РЗМ в Китае составило 70 тыс. т [27]. В США в 2019 г. потребили 13 000 т РЗМ [5], 600 т оксида иттрия [13]. Япония потребила 20 175 т РЗМ в 2016 г., а Китай – около 60 % всего мирового производства [28]. Как видно, снижение потребления РЗМ характерно не только для России. Это свидетельствует о том, что Китай развивает не только добычу и производство РЗМ, но и производство товаров потребления с РЗМ. Например, доля китайских заводов, в том числе зарубежных, в производстве неодимовых магнитов достигает 80 % [7].

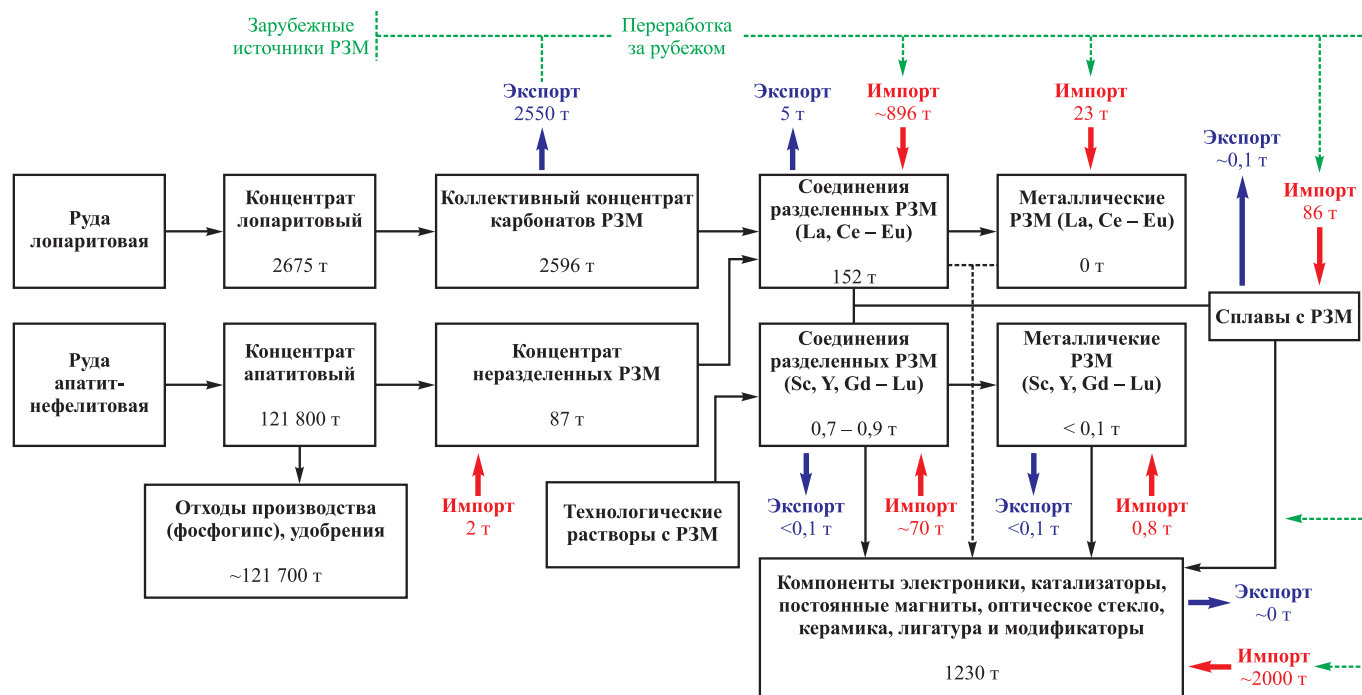


Рис. 1. Баланс производства и потребления РЗМ в 2018 г. (в прямоугольниках указан объем производства, все цифры приведены в пересчете на оксиды РЗМ)

Fig. 1. Balance of REM production and consumption in 2018 (rectangles indicate the volume of production, all figures are given in terms of REM oxides)

Таким образом, проблема РЗМ заключается не в отсутствии сырья или технологий его переработки, а в организации сбыта отечественной продукции с РЗМ на отечественном рынке (импортозамещение), в недостаточном объеме мощностей по разделению РЗМ, низком уровне потребления РЗМ, отсутствии или слабом развитии производств, выпускающих потребительскую продукцию с РЗМ.

Без решения этих вопросов, учитывая монополизацию мирового рынка китайской продукцией, не имеет смысла наращивание мощностей по добыче РЗМ из руд (Томторское [29], Зашихинское, Катугинское, Ловозерское месторождения и др.). Все эти проекты в настоящее время актуальны только с точки зрения обеспечения ниобием отечественной черной металлургии [14]. В нынешнем состоянии производства в России максимальное потребление РЗМ внутри страны может достигать 3200 т в год при условии импортозамещения соответствующих товаров с РЗМ. В то же время, это все равно в несколько раз меньше потребления РЗМ, которое было в нашей стране 30 лет назад.

### ПРИМЕНЕНИЕ РЗМ В МЕТАЛЛУРГИИ

Одной из значимых сфер применения РЗМ является металлургия. По данным [30] металлургия в общемировом потреблении РЗМ в 2016 г. занимала 19 % и находилась на втором месте после постоянных магнитов (22,5 %). Другие источники в разные годы оценивают

долю металлургии в мировом потреблении РЗМ от 7 – 10 [6, 9, 21, 31] до 16 – 20 % [25, 32 – 34]. Возможно, что такое различие связано с учетом производства аккумуляторов и накопителей водорода в разделе со сплавами РЗМ. В США доля металлургии в конечном потреблении РЗМ меняется: в 2016 г. – 15 % [13], в 2019 г. – 5 % [5]. В Европейском Союзе в 2010 г. металлургия потребила 12 % РЗМ [6, 35]. По расчетам авторов, в России металлургией потребляется всего 120 т РЗМ, т. е. 10 % общего объема. Распределение РЗМ по направлениям металлургии России в 2018 – 2019 гг. показано на рис. 2. Подавляющее количество РЗМ (86 %) находит применение в черной металлургии. Добавки РЗМ используют в производстве чугуна для повышения его качества (модификации структуры, очистки от вредных примесей). Добавки 0,02 % церия позволяют получать высокопрочный чугун, близкий по своим свойствам к мягкой низкоуглеродистой стали. Такой вид чугуна на 20 – 25 % дешевле стальных отливок и в 3 – 4 раза дешевле стальных поковок [2]. Иттриевый чугун (0,1 % Y) имеет повышенную в четыре раза износостойкость по сравнению с серым чугуном. Доля чугуна в потреблении РЗМ в металлургии составляет около 50 %. Еще 36 % идет на производство стали в качестве добавки для ее раскисления, дегазации и десульфурации.

Остальное количество РЗМ потребляется в производстве цветных металлов. Для получения магниевых сплавов используют неодим и иттрий. Такие сплавы

обладают высокой жаропрочностью, имеют усиленное сопротивление ползучести, более высокую коррозионную стойкость, хорошие технологические и литейные свойства по сравнению с обычными. Их применяют в авиации и космонавтике. Сплавы алюминия с 0,2 % скандия обладают хорошей свариваемостью, высокими механическими характеристиками. Поэтому их применяют в узлах конструкций космического и авиационного назначения. Небольшое количество РЗМ применяют в производстве жаропрочных сплавов на никелевой основе, выдерживающих воздействие агрессивных сред и высокой температуры. Кроме этого, РЗМ применяют для легирования титановых сплавов, алюминиевых сплавов электротехнической отрасли, сплавов на основе меди, прецизионных и других сплавов.

Похожая иерархия потребления в металлургии Европы и мира описана в работе [9]: чугуны, высокопрочная низколегированная сталь (для автомобильной промышленности), нержавеющая высоколегированная сталь, специальные микролегированные стали и суперсплавы, магниевые сплавы, сплавы алюминия. Структура потребления по элементам в металлургии в мире выглядит следующим образом: 52 % Ce; 26 % La; 17 % Nd; 4 % Pr [25], в России – церий и лантан составляют около 90 %.

#### ПРИМЕНЕНИЕ РЗМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЧУГУНА И СТАЛИ

Редкоземельные металлы при высокой плотности ( $6,76 \text{ г/см}^3$  для церия) и температуре кипения ( $3200 \text{ }^\circ\text{C}$

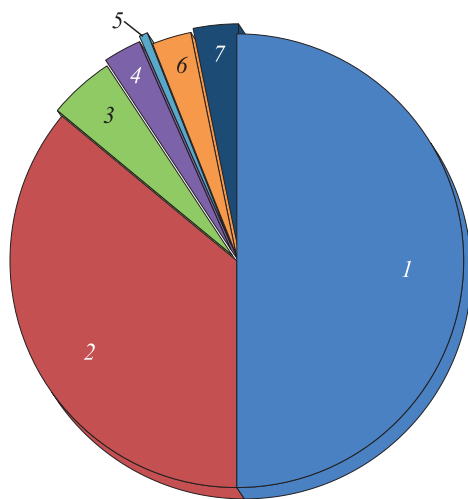


Рис. 2. Структура потребления РЗМ в металлургии России, % (по массе):

1 – чугун (50,0); 2 – сталь (36,0); 3 – сплавы магния (4,7); 4 – сплавы Al-Sc (2,7); 5 – сплавы никеля (0,6); 6 – сплавы для магнитов (2,8); 7 – прочие сплавы (3,3)

Fig. 2. Structure of REM consumption in Russian metallurgy, % mass.: 1 – cast iron (50.0); 2 – steel (36.0); 3 – Mg alloys (4.7); 4 – Al-Sc alloys (2.7); 5 – Ni alloys (0.6); 6 – alloys for magnets (2.8); 7 – other alloys (3.3)

для церия) имеют относительно низкую температуру плавления ( $804 \text{ }^\circ\text{C}$  для церия), а также неограниченную растворимость в расплаве железа и сравнительно низкое давление паров. Это позволяет им длительное время сохраняться в расплаве. При введении в чугун и сталь РЗМ взаимодействуют с растворенными в них газообразующими элементами (H, N, C, O, S), As, P и цветными металлами (Pb, Sb, Bi, Sn). Редкоземельные металлы оказывают влияние на поверхностное натяжение жидкого металла, способствуя уменьшению адсорбции вредных примесей при кристаллизации стали, повышая чистоту границ зерен и пластичность металла. Однако низкая растворимость РЗМ в твердом железе при большой концентрации может привести к их выделению по границам зерен в виде эвтектики с температурой плавления ниже температуры прокатки. Редкоземельные металлы обладают модифицирующим действием, способствуя измельчению кристаллов металла, влияют на структуру, морфологию и распределение включений и примесей в стали. В работе [36] подробно рассмотрено влияние РЗМ на свойства различных типов стали.

Чаще всего РЗМ применяют в литейном производстве машиностроительных, механоремонтных, трубопрокатных, металлургических и цехах автомобильного и железнодорожного транспорта для обработки чугуна и стали. Модифицирование чугуна РЗМ (3 – 5 кг/т) позволяет получать в его структуре шаровидную форму графита, улучшая его служебные свойства. Модифицирование церием способствует повышению прочности, твердости и износостойкости за счет измельчения карбидов. Добавление лигатур, содержащих Y, La, Ce в количестве 0,3 – 0,5 %, приводит к перерождению структуры чугуна с преобладанием изолированных мелких карбидных включений. Повышается износостойкость, улучшается обрабатываемость режущим инструментом.

Для стали оптимальное содержание РЗМ составляет 0,02 – 0,05 %, а количество присаживаемых РЗМ – от 0,5 до 3,0 кг/т. В результате микролегирования достигается улучшение технологических и служебных свойств стали (горячая пластичность, свариваемость, жаропрочность, адгезия к шлаку, форма неметаллических включений, структурная неоднородность, механические свойства). Для анализа структуры потребления по видам стали использовали данные, полученные ЦНИИчермет им. И.П. Бардина от двух российских предприятий черной металлургии за 2017 – 2019 гг. Первое предприятие (рис. 3) специализируется на массовом производстве стали. Объем производства стали на нем превышает 10 млн т в год, из них только 31 тыс. т с добавкой РЗМ. Наиболее массовой сталью с РЗМ является сталь для трубной заготовки, на втором месте – рельсовая сталь.

Второе предприятие (рис. 4) специализируется на производстве штампованной продукции. Объем производства стали на нем составляет 0,2 млн т

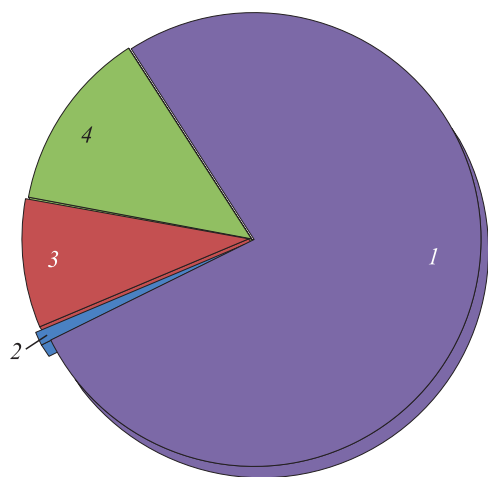


Рис. 3. Структура потребления РЗМ для массового производства стали, % (по массе):

1 – сталь для трубной заготовки (76,8); 2 – коррозионностойкие нержавеющие стали (1,0); 3 – конструкционные, сварные, износостойкие стали (9,4); 4 – рельсовые стали (12,8)

Fig. 3. Structure of REM consumption for mass production of steel, % mass.:

1 – steel for pipe billet (76.8); 2 – corrosion resistant stainless steels (1.0); 3 – structural, welded, wear-resistant steels (9.4); 4 – rail steel (12.8)

в год, из них только в 2 тыс. т стали добавляют РЗМ. Таким образом, доля стали, производимая с добавкой РЗМ, не превышает 1 % общего производства. Среди специальных сталей по потреблению для них РЗМ выделяются высокопрочные конструкционные (0,005 – 0,050 % Ce, 0,015 – 0,030 % Y, 0,05 % La), коррозионностойкие, нержавеющие (0,01 – 0,08 % Ce, 0,05 % Y), стали для изготовления коррозионностойкой трубной заготовки (0,03 % Ce), а также жаропрочные стали (0,01 – 0,20 % Ce).

Отдельно следует остановиться на скандии. Введение микродобавок скандия снижает содержание N, C, O, P, S в сталях 01X18T и 05X18N10T, положительно влияет на структуру и свойства. Скандий, являясь поверхностно-активным элементом по отношению к Fe–Cr–Ni расплавам, оказывает на них комплексное воздействие – рафинирующее, модифицирующее и легирующее [37]. Добавки скандия способствуют замедлению роста зерна в сталях при нагреве, повышают их высокотемпературную пластичность и коррозионную стойкость, а также стойкость сталей ферритного класса против «475-градусной» хрупкости. В настоящее время в России промышленные сплавы на основе железа с добавками скандия не производятся. Применение в качестве легирующей добавки скандия металлического или запрессованной смеси чистых металлов затруднено из-за его высокой стоимости. В связи с этим в ЦНИИчермет им. И.П. Бардина прорабатывается вопрос получения скандийсодержащих лигатур на основе железа и никеля с достаточно низкой температурой плавления и растворения в жидкой стали.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ ФОРМЫ РЗМ

До сих пор распространенной формой добавок РЗМ в чугун и сталь остаются сплавы, полученные путем электролиза (мишметалл, ферроцерий, ферроцерий с магнием ФЦМ-5). Мишметалл представляет собой сплав легких РЗМ в их природном соотношении, иногда для его производства применяют смесь оксидов лантана и церия после отделения от них неодима и более тяжелых РЗМ. Такие сплавы, как правило, дороже ферросплавов, характеризуются низким и нестабильным усвоением РЗМ, пирофорные, требуют герметичной тары при хранении, специальных приемов при измельчении, а также специальных методов и устройств для ввода в жидкий металл. Их применение оправдано в силу исторически сложившихся обстоятельств (это первые и наиболее доступные сплавы с РЗМ), а также для ряда специальных сталей и сплавов, где строго регламентировано количество примесей, в том числе железа, например, для жаропрочных сплавов на никелевой основе.

Чистые РЗМ в виде металлов (иттрий, лантан, церий, неодим) применяют в производстве специальных сталей и цветных металлов. В них регламентировано

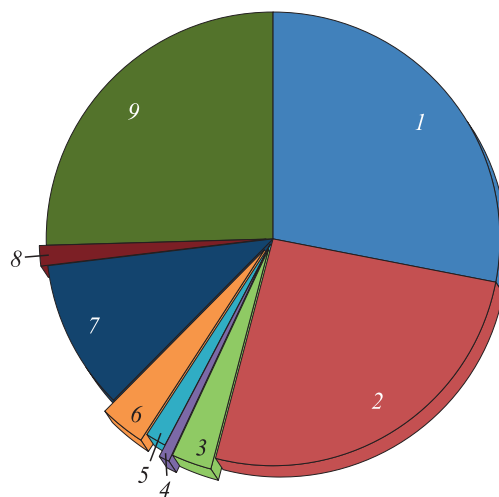


Рис. 4. Структура потребления РЗМ на предприятии специальных сталей, % (по массе):

1 – конструкционные, высокопрочные (27,9); 2 – коррозионностойкие, нержавеющие (26,1); 3 – мартенситно-старееющие стали (2,9); 4 – прецизионные (0,8); 5 – стали для сварки и наплавки (1,5); 6 – сталь жаропрочная высоколегированная (3,3); 7 – жаропрочные на никелевой основе (10,7); 8 – стали для отливок (1,5); 9 – для изготовления коррозионностойкой трубной заготовки (25,4)

Fig. 4. Structure of REM consumption at the enterprise of special steels, % mass.:

1 – structural, high-strength steels (27.9); 2 – corrosion-resistant, stainless steels (26.1); 3 – maraging steel (2.9); 4 – precision steel (0.8); 5 – steels for welding and surfacing (1.5); 6 – heat-resistant high alloyed steel (3.3); 7 – heat-resistant steel on a nickel basis (10.7); 8 – steel for castings (1.5); 9 – steel for production of corrosion-resistant pipe billets (25.4)

содержание отдельных РЗМ. Различия в действии индивидуальных РЗМ на свойства чугуна и стали – до конца не изученный вопрос. Редкоземельные металлы отличаются по физическим свойствам – плотности, температуре плавления и кипения (скандий, иттрий, РЗМ цериевой и иттриевой группы), атомным радиусом. Металлический иттрий и иттриевые лигатуры применяют в производстве чугуна и стали для изготовления деталей, работающих в условиях больших нагрузок, низких температур и абразивного износа. Показано более эффективное действие иттрия по сравнению с церием для получения чугуна с шаровидным графитом. Иттрий и скандий могут применяться в сплавах на основе железа для ядерных реакторов. В них иттрий связывает бор и сосредоточен в объеме зерен, вследствие чего образующийся из бора гелий не ослабляет границ зерен, предотвращая охрупчивание. Иттрий используется в сплавах нагревательных элементов, в суперсплавах, высокотемпературных сверхпроводниках, для производства износостойких и коррозионностойких режущих инструментов. В металлургии замечено, что индивидуальные РЗМ дают более выраженный эффект по сравнению с коллективными РЗМ. Так, в отливках из высокопрочного чугуна при использовании металлического лантана получены более мелкие включения графита, снижена усадка при затвердевании отливок по сравнению с коллективными РЗМ. При модифицировании стали иногда также предпочитают применять церий вместо мишметалла. Сплавы никеля с РЗМ (Ni–Ce) применяют для легирования нержавеющей, мартенситно-старееющей, стали для отливок и др. В работе [38] для изменения структуры низкоуглеродистой стали описано применение празеодима. По данным ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, присадка лигатур на кремниевой основе с самарием или гадолинием в Cr–Ni–Mo стали способствует измельчению литой структуры и уменьшению зоны столбчатых кристаллов, повышает прочностные и пластические свойства стали, значения ударной вязкости, хладостойкость. В работе [39] приведены данные о свойствах индивидуальных РЗМ при их добавлении в различные сплавы.

Ферросплавы на кремниевой основе типа ФС30РЗМ30 получают в электропечах из концентрата РЗМ с использованием углерода, кремния и алюминия в качестве восстановителя. С точки зрения затрат – это наиболее экономичные сплавы, пригодные для крупнотоннажного производства. Сотрудниками ЦНИИчермет им. И.П. Бардина разработаны технологии производства ряда марок и лигатур с РЗМ, содержащих как индивидуальные РЗМ, так и их смесь. Данные технологии характеризуются существенной экономией сырья и энергоресурсов [40, 41]. Такие сплавы лучше усваиваются сталью и стоят дешевле по сравнению с мишметаллом. Они применяются в производстве чугуна и стали, причем как в виде сплавов с РЗМ цериевой группы (СЦЕМИШ), так и с РЗМ иттриевой группы

(СИИТМИШ). Не окисляются при хранении, повышают стабильность свойств конечной продукции. Содержание РЗМ составляет 15 – 30 %. Однако такие ферросплавы часто неприемлемы для обработки специальных сплавов и стали из-за высокого содержания в них кремния. В работе [42] отмечено, что 90 % всей литейной стали выплавляется в электродуговых и индукционных печах с кислой футеровкой. При условии многократного переплава отходов (литников, прибылей) происходит постепенно увеличение концентрации кремния в сплавах. Неметаллические включения, богатые кремнием, загрязняют металл и распределяются строчками на границе зерен, снижая служебные характеристики стали. Ферросплавы на кремниевой основе типа ФС30РЗМ30 раньше выпускал Ключевский завод ферросплавов (около 130 т в год в пересчете на РЗМ в 1970-е годы). Сегодня их производство и потребление в России значительно сократилось (не более 10 % всех форм РЗМ в металлургии). Кроме Ключевского завода ферросплавов, такие сплавы в России выплавляют ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», ООО «Спецферросплав», ОАО «НИИМ». Раньше применение сплавов с РЗМ ограничивалось несовершенством и сложностью метода их введения в расплав, что приводило к нестабильности свойств металлопродукции [43]. Сегодня метод модифицирования сплава при разливе в ковш получил широкое распространение в практике металлургических предприятий благодаря развитию устройств для ввода модификаторов мелких фракций, при этом значительно снизился их расход.

При внепечной обработке стали раскисление, рафинирование, модифицирование совмещаются с микролегированием и осуществляются в разливочном ковше [44]. Для введения РЗМ в сталь при этом пользуются одним из следующих методов: присадка на струю при сливе металла из печи в ковш, модифицирование в форме, введение модификатора в виде порошковой проволоки непосредственно в ковш [45]. Наиболее универсальные и эффективные модификаторы в – плавленной форме. Модификаторы в виде механической смеси разных компонентов используют в наполнителях порошковой проволоки [46]. Комплексные модификаторы, наряду с РЗМ, содержат В, Mg, Al, Si, Ca, Cu, Zr, V и др. Лигатуры и плавные модификаторы не обладают пироэффектом, усваиваются в 2 – 3 раза лучше по сравнению с мишметаллом и чистыми металлами.

Бескремнистые комплексные лигатуры (БКЛ) на никелевой основе, содержащие 5 – 30 % Al, 5 – 15 % Ca, 10 – 30 % РЗМ, V, Mo, B, Nb, N, кроме литейного производства (до 3 кг/т) применяют в спецэлектрометаллургии – в электрошлаковом переплаве, литье и обогреве [42]. Они благоприятно влияют на литейные свойства, структуру и эксплуатационные свойства стали, обладают исключительной раскисляющей и рафинирующей способностью. Такие сплавы внепечным кальцийтермическим методом выпускают компании

АО «Росредмет», ООО «Комплексные модификаторы». Базовая марка БКЛ (АКЦе) имеет в составе 20 % РЗМ, 57 % никеля, 20 % алюминия и 3 % кальция. Помимо базовой марки БКЛ, выпускаются лигатуры, модифицированные ванадием (АКЦеФ), титаном (АКЦеТ), ниобием (АКЦеБ), титаном и ниобием (АКЦеТБ). Предлагаемые БКЛ на железной основе – АКЦеЖ и КЦеЖ. Бескремнистые комплексные лигатуры, одновременно с глубоким раскислением, рафинированием и модифицированием структуры, обеспечивают микролегирование, что приводит к повышению в 2 – 3 раза механических и эксплуатационных характеристик, особенно пластичности, ударной вязкости, хладостойкости, усталостной прочности [44]. В некоторых случаях ограничения по содержанию алюминия настолько жесткие, что применение таких БКЛ неприемлемо. По этой же причине иногда ограничивают применение ферросплавов типа ФС30РЗМ30, кальция металлического, полученных с использованием алюминия в качестве восстановителя.

Как правило, производители БКЛ указывают на ограниченность применения и худшие характеристики ферросплавов типа ФС30РЗМ30 и комплексных модификаторов с кремнием из-за высокого содержания в них кремния [42, 44]. Однако сегодня наиболее распространены комплексные модификаторы с РЗМ на основе ферросилиция с щелочноземельными металлами, а также на основе силикокальция или кремния с РЗМ (силициды РЗМ). Комплексные модификаторы типа Fe–Si–Mg–РЗМ можно получать либо в индукционных печах путем сплавления магния с ферросилицием и другими компонентами, либо непосредственно в ферросплавных цехах путем растворения вращающихся чушек магния в жидком первичном ферросилиции. В России их получают в индукционных печах. Недостатком технологии получения модификаторов сплавлением магния с ферросплавами является повторное плавление кремния и ферросилиция. Для получения высокопрочных чугунов с шаровидным и, особенно, вермикулярным графитом важную роль в составе модификатора играют РЗМ. Для обработки чугуна в разливочном ковше применяют модификаторы серии Сферомаг и Сферомакс следующего химического состава: 4,7 – 7,5 % Mg; 0,3 – 5,0 % Ca; 0,5 – 3,2 % РЗМ; 1,8 – 3,0 % Ba; 45 – 55 % Si; <1,5 % Al; остальное – Fe. Применение аналогичных модификаторов на основе сплавов с барием и стронцием ограничено в России, в то время как в США такие сплавы производят в больших масштабах углетермическим методом в рудовосстановительных печах [47]. Для обработки стали применяют модификаторы серии Insteel, содержащие 7 – 12 % РЗМ, представляющие собой сплавы, например, SiCaBaРЗМ, SiCaBaРЗМА1 [45]. Они позволяют повысить коррозионную стойкость стали для трубной заготовки, эффективно очищать расплав от неметаллических включений, снизить количество растворенных газов, улучшить

технологические свойства изделий, снизить температуру разлива за счет повышения ее жидкотекучести, что позволяет ослабить развитие горячих термических трещин [45, 48, 49]. Лигатуры и модификаторы в России производят ООО «НПП Технология», ОАО «НИИМ», ООО «Комплексные модификаторы». С производством лигатур с РЗМ для черной металлургии также связаны (были связаны) ООО «НКМ Норд», ООО «НПО БКЛ», АО «Сибирский химический комбинат».

По данным [9] в мире в металлургии в основном применяют РЗМ в виде мишметалла и силицидов РЗМ типа ФС30РЗМ30. Однако в литейном производстве Европы и Северной Америки все больше потребляется ферросилиций с магнием (FeSiMg), содержащий меньшее количество РЗМ. Редкоземельные металлы стараются заменять щелочноземельными металлами. Указаны следующие формы РЗМ, используемые в металлургии: чугун и сталь (мишметалл, силициды РЗМ, церий), высокопрочная низколегированная сталь (мишметалл и церий), нержавеющая высоколегированная сталь (Ce, Y), специальные микролегированные стали и суперсплавы (La, Gd, Y, Ce, Nd, Pr), магниевые сплавы (Y, Nd, Gd, Pr), сплавы алюминия (Y, Ce, La).

#### **АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ РЗМ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

Структура потребления РЗМ по формам, по оценке авторов, выглядит следующим образом: 80 – 90 % в виде комплексных модификаторов; 10 – 20 % в виде мишметалла, чистых РЗМ, ферросплавов типа ФС30РЗМ30. Практически все исходные материалы с РЗМ для металлургии ввозят из-за рубежа (табл. 1). Основную часть мишметалла, ферросплава с РЗМ, лантана и церия (около 90 т) потребляют для получения комплексных модификаторов, остальное используют напрямую для легирования чугуна, стали и сплавов цветных металлов.

Поскольку в основном находят применение комплексные модификаторы на кремниевой основе, то вопрос замены мишметалла для их изготовления на сплавы типа ФС30РЗМ30 не принципиален с точки зрения металлургии. Проблема заключается в стоимости материалов с РЗМ, часто ферросплавы с РЗМ отечественного производства стоят также, а то и дороже импортного мишметалла. Аналогично и стоимость отечественных концентратов и оксидов РЗМ оказывается не ниже стоимости импортных сплавов и металлов с РЗМ. Из-за дешевизны и более широкой доступности, отечественная металлургия ориентирована на импортный мишметалл, чистые РЗМ и приготовленные из них модификаторы. Отечественный рынок РЗМ небольшой, характеризуется множеством пользователей с небольшими объемами потребления разнообразной продукции, производителей мало, они не мотивированы к конкуренции и снижению стоимости своей продукции. Поэтому вопрос расширения отечественного рынка сырьевых



## Импортируемые материалы и области их применения в металлургии России

Table 1. Imported materials and their applications in Russian metallurgy

Материал	Масса, т	Область применения
Мишметалл, ферроцерий, Се – металл	80 – 85	Сталь, чугун, производство модификаторов
Ферросплавы типа ФС30РЗМ30	До 10	Сталь, чугун, производство модификаторов
У – металл	0,2	Сталь, магниевые сплавы
La – металл	15,0	Сталь, производство модификаторов
Nd – металл	5	Магниевые сплавы
Ni – Се – лигатура		Сталь, никелевые сплавы
Оксиды РЗМ		Производство лигатур и модификаторов

материалов с РЗМ для металлургии остается нерешенной актуальной задачей. Очевидно, что и организация многотоннажного производства лигатур с РЗМ электропечным способом должна привести к снижению их стоимости по сравнению с получением модификаторов из мишметалла и чистых РЗМ.

Потребление РЗМ в металлургии России существенно возросло за последние годы. В 1991 г. оно составляло 790 т, в 1998 г. – 13 т [23]. В 2011 г. было импортировано всего 15 т РЗМ (10 т ферроцерия и 5 т лантана), вместе с тем часть металлов вырабатывалась на территории России из импортных фторидов РЗМ (20 т) [50]. По данным Минпромторга России, за 2018 г. потребление РЗМ в металлургии составляло 110 т [51]. По расчетам авторов, в 2019 г. объем потребления РЗМ в металлургии составлял уже около 120 т, из них чуть более 100 т – в черной металлургии. Несмотря на значительный рост потребления РЗМ в металлургии России, объем внутреннего рынка остается небольшим, он не достиг показателей 1991 г. В России существенно возрос и общий объем потребления РЗМ, т в год: 1991 г. – 3000; 1998 г. – 480 [23]; 2000 г. – 300 [50]; 2005 г. – 400 [27]; 2010 г. – 600 [50]; 2018 г. – 1200 [51]; 2019 г. – 1230. Однако это существенно меньше заявленных 2 – 3 тыс. т даже по «инерционному сценарию» развития промышленности РЗМ в соответствии с государственной программой «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности на период до 2020 года» [8]. Авторы той же работы [8] прогнозировали потребление РЗМ в госкорпорации «Ростехнологии» на уровне 4 тыс. т в 2020 г., а на втором месте по потреблению должны были стать предприятия оборонно-промышленного комплекса. Наступил 2020 г.: госкорпорация «Ростехнологии» больше не участвует в Томторском проекте [52], а потребление РЗМ предприятиями ОПК, связанное в первую очередь с металлургией, незначительное.

Потребление РЗМ в мировой металлургии также растет. В 2008 г. для металлургии использовали 11 503 т РЗМ в пересчете на оксиды в виде ферросплавов, лига-

тур, мишметалла и чистых металлов в составе 2990 т  $La_2O_3$ , 5980 т  $CeO_2$ , 1900 т  $Nd_2O_3$ , 633 т  $Pr_6O_{11}$  [53]. По данным [30] в 2016 г. потребление РЗМ в металлургии составило 30 тыс. т в пересчете на оксиды, из них: Китай – 23 тыс. т, Япония и страны Юго-Восточной Азии – 3 тыс. т, США – 2 тыс. т, остальные страны – 2 тыс. т. В странах Европейского Союза в 2010 г. в металлургии использовано 1000 т РЗМ [6]. В США в металлургии в 2019 г. потреблялось около 650 т, а судя по экспорту, производится еще больше чистых РЗМ и их сплавов (импорт сплавов РЗМ в 2019 г. составил 310 т, а чистых металлов РЗМ – 590 т, объем экспорта составил 1400 и 100 т соответственно) [5]. Для сравнения потребления РЗМ в металлургии разных стран авторы учитывали объем производства стали и объем потребления РЗМ во всей металлургии (табл. 2).

Такое сравнение довольно условное и не учитывает распределение РЗМ для производства разных сплавов, в том числе для аккумуляторов. Однако, на взгляд авторов, оно характеризует уровень производства таких

Таблица 2

## Условное потребление РЗМ на тонну стали в странах мира

Table 2. Conditional consumption of REM per ton of steel in the world

Страна	Расход РЗМ на 1 т стали, г	Год
Мир в целом	18,43	2016
	9,43	2008
Китай	28,45	2016
США	25,45	2016
Япония и страны Юго-Восточной Азии	24,49	2016
Европейский Союз	5,79	2010
Россия	1,71	2019
Россия (РСФСР)	8,78	1991

марок чугуна и стали, к изготовлению которых предъявляют более жесткие требования по сравнению с массовой продукцией. Это продукция с высокой добавленной стоимостью в металлургии. По потреблению РЗМ в металлургии в России наблюдается резкое отставание не только от мировых лидеров (в 14 – 17 раз), но и от общемирового уровня (в 11 раз). Отставание России от мировых лидеров будет еще более фатальным, если учесть, что суровые климатические условия, высокая интенсивность эксплуатации металлических изделий, сравнительно низкий металлофонд, сложность условий добычи и географического положения месторождений полезных ископаемых, длительный срок службы введенного в хозяйственный оборот металла должны приводить к еще более высокой потребности в качественной стали.

Удельное потребление РЗМ в металлургии в России снизилось в 5 раз по сравнению с 1991 г. Это объясняется снижением объемов производства и большой долей импорта металлургической продукции с РЗМ. По данным авторов, доля импорта в потреблении коррозионностойких, нержавеющих сталей составляет 77,3 %, инструментальных быстрорежущих сталей – почти 100 %, машиностроительных сталей (мартенситно-стабилизирующие, подшипниковые, пружинные, высокопрочные, рельсовые) – до 70 % по отдельным видам. Среди товаров потребления с РЗМ – режущий инструмент, посуда и изделия из нержавеющей стали также во многом импортные. Поэтому при решении вопроса импортозамещения и роста производства специальных сталей и сплавов, а также товаров потребления на их основе следует ожидать роста потребления РЗМ.

В потреблении РЗМ для производства высокопрочного чугуна также имеется резерв роста. Например, Россия по потреблению труб из высокопрочного чугуна отстает от Китая и стран Европы [54]. Единственный завод в России по производству таких труб – Липецкий металлургический завод «Свободный сокол» потребляет всего 27 тыс. т чугуна. В технологически развитых странах уменьшается доля отливок из стали и серого чугуна, а производство отливок из чугуна с шаровидной формой графита ежегодно растет на 2 – 3 %. Они используются не только для производства труб, но и для деталей металлургического оборудования, станкостроения, в тяжелом, транспортном, сельскохозяйственном машиностроении [55]. По данным работы [56], в России в период с 2006 по 2012 гг. выпуск отливок из высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита вырос на 12 % (до 900 тыс. т), а производство литья в целом сократилось в 4,5 раза с советских времен, сократилось число литейных производств с 3500 до 1250 предприятий, ликвидировано 10 НИИ литейного производства.

## Выводы

Для решения проблем отрасли РЗМ в России необходим организационно-экономический механизм, по-

зволяющий реализовывать продукцию отечественной редкоземельной отрасли на внутреннем рынке взамен импортной. После этого необходимо будет нарастить мощности по разделению РЗМ. Ввод новых мощностей по добыче РЗМ не имеет смысла без создания новых отраслей промышленности, ориентированных на их потребление, в том числе в металлургии.

Мировая добыча РЗМ составляет 210 тыс. т в пересчете на оксиды. Развиваются не китайские проекты добычи и переработки РЗМ. Благодаря организации масштабного производства товаров потребления с РЗМ Китай остается мировым лидером в отрасли: в добыче и переработке РЗМ, в производстве товаров потребления с РЗМ. Разные источники оценивают долю металлургии в мировом потреблении РЗМ от 10 до 20 %.

Объем потребления РЗМ в России составляет 1230 т, из них 120 т потребляется металлургией. По направлениям металлургии – 86 % потребления РЗМ приходится на черную металлургию, из них 50 % идет на чугун и 36 % на сталь. Чаще всего РЗМ применяют в производстве высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита. Наиболее массовой сталью с РЗМ является сталь для трубной заготовки, на втором месте – рельсовая сталь. Доля стали с РЗМ не превышает 1 % суммарного объема ее производства.

В черной металлургии РЗМ используют в виде их сплавов (мишметалл, ферроцерий), чистых металлов (лантан, церий, иттрий), силицидов в составе ферросплавов на основе ферросилиция, комплексных модификаторов на основе кремния и без него.

Практически все исходные материалы с РЗМ для металлургии России импортируются (мишметалл, ферросплавы и чистые металлы). Вопрос импортозамещения на отечественном рынке сырьевых материалов с РЗМ для металлургии остается нерешенной актуальной задачей. Организация многотоннажного производства лигатур с РЗМ электропечным способом должна привести к снижению их стоимости по сравнению с получением модификаторов из мишметалла и чистых РЗМ. Проблема заключается в высокой стоимости продукции с РЗМ отечественных предприятий.

Несмотря на существенный рост потребления РЗМ в металлургии, объем внутреннего рынка остается небольшим. По потреблению РЗМ в металлургии в России наблюдается резкое отставание не только от мировых лидеров, но и от общемирового уровня. При решении вопроса импортозамещения и роста потребления высокопрочного чугуна, специальных сталей и сплавов, а также товаров потребления на их основе следует ожидать роста потребления РЗМ. По масштабам применения РЗМ отечественная металлургия не соответствует современным требованиям. При выводе отечественной металлургии на мировой уровень развития потребность в РЗМ может возрасти в 5 – 10 раз.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ИТС 24-2017. Производство редких и редкоземельных металлов. – М.: Бюро НДТ, 2017. – 202 с.
2. Поляков Е.Г., Нечаев А.В., Смирнов А.В. Металлургия редкоземельных металлов. – М.: Metallurgizdat, 2018. – 732 с.
3. Юшина Т.И., Петров И.М., Гришаев С.И., Черный С.А. Обзор рынка РЗМ и технологий переработки редкоземельного сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S1. С. 577 – 607.
4. Годовой отчет открытого акционерного общества «Соликамский магниевый завод» за 2018 год. – Соликамск, 2019. – 91 с.
5. Mineral commodity summaries 2020. Ser.: Mineral Commodity Summaries. – Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2020. – 200 p.
6. ERECON (2015). Strengthening the European Rare Earths Supply Chain: Challenges and Policy Options. Kooroshy J., Tiess G., Tukker A. ets. URL: [https://www.mawi.tu-darmstadt.de/media/fm/homepage/news\\_seite/ERECON\\_Report\\_v05.pdf](https://www.mawi.tu-darmstadt.de/media/fm/homepage/news_seite/ERECON_Report_v05.pdf).
7. Gholz E. Rare Earth Elements and National Security. – New York: Council on Foreign Relations® Inc, 2014. – 20 p.
8. Архипова Н.А., Левченко Е.Н., Волкова Н.М., Усова Т.Ю. Модель развития промышленности и рынка РЗМ в России // Разведка и охрана недр. 2014. № 9. С. 13 – 18.
9. Development of a Sustainable Exploitation Scheme for Europe's Rare Earth Ore Deposits. European REE market survey – Task 1.1.2 // Eds: E. Machacek, P. Kalvig. GEUS and D'Appolonia. 2017. – 163 p.
10. Golev A., Scott M., Erskine P.D. etc. Rare earths supply chains: Current status, constraints and opportunities // Resources Policy. 2014. Vol. 41. P. 52 – 59.
11. Binmams K., Jones P.T. Rare earths and the balance problem // Journal of Sustainable Metallurgy. 2015. Vol. 1. No. 1. P. 29 – 38.
12. Некитайские редкоземельные // Metallургический бюллетень. 2018. № 10 – 11. С. 56 – 61.
13. Gambogi J. Rare earths // 2016 Minerals Yearbook. U.S. Geological Survey. 2019. P. 60.1 – 60.16.
14. Волков А.И. Состояние и перспективы использования редких металлов в черной металлургии // Разведка и охрана недр. 2020. № 3. С. 11 – 18.
15. Абрамов А.М., Соболев Ю.Б., Галиева Ж.Н. и др. Освоение технологии разделения РЗК ОАО «СМЗ» на автоматизированном каскаде центробежных экстракторов собственной конструкции (модель ЭЦ-1000ПБ) // Цветная металлургия. 2015. № 4. С. 53 – 58.
16. Галиева Ж.Н., Волобуев О.И., Ячменев А.А. и др. Универсальная технология разделения редкоземельных концентратов (РЗК) в каскадах центробежных экстракторов: разработка технологии и оборудования, освоение производства // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. 33. № 1 (211). С. 33 – 35.
17. Акрон: секрет успеха // Редкие земли. 2017. Т. 8. № 1. С. 76 – 81.
18. Смышляев В.Ю. О попутной добыче скандия из продуктивных рудосторов подземного выщелачивания на Далматовском месторождении урана // Горный журнал. 2017. № 8. С. 28 – 32.
19. Пробуждение российского скандия // Metallургический бюллетень. 2018. № 4 – 5 (192). С. 76 – 81.
20. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов России в 2018 году. – М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2019. – 426 с.
21. Balaram V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact // Geoscience Frontiers. 2019. Vol. 10. No. 4. P. 1285 – 1303.
22. Косынкин В.Д., Трубаков Ю.М., Сарычев Г.А. Прошлое и будущее редкоземельного производства в России // Металлы Евразии. 2011. № 5. С. 40 – 53.
23. Верещагин Ю.А., Емелина Т.Н. Редкоземельная сырьевая база России: прошлое, настоящее, будущее // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № S1. С. 24 – 34.
24. Statistical Compendium. Special publication. – U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1993. – 417 p.
25. Commodities at a glance. Special issue on rare earths. – New York, Geneva: United Nations conference on trade and development UNCTAD, 2014. No. 5. – 58 p.
26. Schüller D. Rare Earths – Facts & Figures. – Darmstadt: Öko-Institut, 2011. – 7 p.
27. Романова О.А., Позднякова Е.А. Развитие редкоземельного производства: мировые, национальные и региональные тенденции. – Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2011. – 46 с.
28. Ganguli R., Cook D.R. Rare earths: A review of the landscape // MRS Energy & Sustainability. 2018. Vol. 5. Article e9.
29. Seregina I.F., Volkov A.I., Ossipov K., Bolshov M.A. Characterization of REE-Nb ores by a combination of spectrochemical techniques // Spectrochimica Acta Part B – Atomic Spectroscopy. 2018. Vol. 148. P. 172 – 182.
30. Suli L.M., Ibrahim W.H.W., Aziz B.A. etc. A review of rare earth mineral processing technology // Chemical Engineering Research Bulletin. 2017. Vol. 19. P. 20 – 35.
31. Усова Т.Ю. Зарубежные технологии раздельного извлечения редкоземельных элементов // Редкие земли. 2018. Т. 9. № 1. С. 136 – 147.
32. Стрекопытов В. Ростех: редкоземельное направление // Редкие земли. 2017. Т. 8. № 1. С. 82 – 91.
33. Мелентьев Г.Б. Редкие земли России: перспективы и приоритеты // Редкие земли. 2015. Т. 4. № 1. С. 56 – 60.
34. Naumov A.V. Review of the world market of rare-earth metals // Russian Journal of Non-ferrous Metals. 2008. Vol. 49. No. 1. P. 14 – 22.
35. Guyonnet D., Planchon M., Rollat A. etc. Material flow analysis applied to rare earth elements in Europe // Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 107. P. 215 – 228.
36. Fei Pan, Jian Zhang, Hao-Long Chen etc. Effects of rare earth metals on steel microstructures // Materials (Basel). 2016. Vol. 9. No. 6. P. 417.
37. Свистунова Т.В., Бобкова О.С., Белясов Б.Д. Влияние скандия на структуру и свойства коррозионноустойчивых сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2008. № 5 (635). С. 9 – 14.
38. Drapala J., Brozova S., Szurman I. etc. Influence of selected rare earth metals on structural characteristics of 42CrMo4 steel // Metalurgija. 2016. Vol. 55. No. 4. P. 757 – 760.
39. Collins J.F., Calkins V.P., McGurty J.A. Applications of rare earths to ferrous and non-ferrous alloys. – Cincinnati: General Electric, 1959. – 29 p.
40. Серегин А.Н. Применение сплавов РЗМ для повышения качества массовой металлургической продукции // Актуальные вопросы получения и применения РЗМ-2015: Сб. матер. Междунар. науч.-практич. конф. Москва, 25 июня 2015 г. – М.: ОАО «Ин-т "ГИНЦВЕТМЕТ"», 2015. С. 27 – 33.
41. Стулов П.Е., Серегин А.Н., Корзун В.К. Разработка технологии переработки редкоземельного сырья с получением лигатур // Актуальные вопросы получения и применения РЗМ-2015: Сб. матер. Междунар. науч.-практич. конф. Москва, 25 июня 2015 г. – М.: ОАО «Ин-т "ГИНЦВЕТМЕТ"», 2015. С. 161 – 163.
42. Примеров С.Н., Вихляев В.Б., Лихошва В.П. Комплексные бескремнистые лигатуры редкоземельных металлов для внепечной обработки железоуглеродистых расплавов // Литейное производство. 1984. № 11. С. 9 – 10.
43. Ферросплавы с редко- и щелочноземельными металлами / И.В. Рябчиков, В.Г. Мизин, Н.П. Лякишев, А.С. Дубровин. – М.: Металлургия, 1983. – 272 с.
44. Емелина Т., Верещагин Ю. Редкоземельные элементы: металлургические перспективы // Уральский рынок металлов. 2007. № 5. С. 69 – 73.
45. Голубцов В.А., Дынин А.Я., Рогожина Т.В. и др. Применение продукции компании НПП при модифицировании стали // Литье и металлургия. 2009. № 3(52). С. 245 – 253.
46. Пат. 2530190 РФ. Модификатор для стали / В.В. Назаратин, А.В. Дегтярев, М.А. Егорова и др.; опубл. 10.10.2014. Бюл. № 28.

47. Зенкин Р.Н., Вальтер А.И. Модификаторы и технологии внепечной обработки высокопрочного чугуна // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 11. Часть 1. С. 30 – 41.
48. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В., Маринцев С.Н. и др. Использование редкоземельных металлов в технологии производства трубных марок стали // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2006. № 4. С. 51 – 53.
49. Голубцов В.А., Дынин А.Я., Шуб Л.Г. Микрокристаллические модификаторы серии Insteel® - путь к повышению срока службы труб // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2008. № 1. С. 55 – 58.
50. Литвинова Т.Е. Получение соединений индивидуальных РЗМ и попутной продукции при переработке низкокачественного редкометалльного сырья: Дис. ... докт. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2014. – 318 с.
51. Потребление РЗМ в России составило 1200 т за 2018 год // Металлургический бюллетень. 2019. № 4 – 5. С. 35 – 36.
52. Зайнуллин Е. Охота к перемене месторождений. «Ростех» вышел из редкоземельного проекта // Газета «Коммерсантъ» № 144 от 14.08.2019. С. 1.
53. Charalampides G., Vatalis K.I., Apostoplos B., Ploutarch-Nikolas B. Rare earth elements: Industrial applications and economic dependency of Europe // Procedia Economics and Finance. 2015. Vol. 24. P. 126 – 135.
54. Храменков С.В., Алиференков А.Д., Примин О.Г. Трубы из высокопрочного чугуна для систем водоснабжения и водоотведения. – М.: МГСУ, 2015. – 192 с.
55. Гнатуш В.А., Дорошенко В.С. Тенденции мирового рынка литья из чугуна с шаровидным графитом // Процессы литья. 2017. № 2 (122). С. 70 – 78.
56. Дибров И.А. Состояние и перспективы литейного производства России // Выступление на XI Съезде литейщиков в Екатеринбурге 16 – 19 сентября 2013 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.unido-russia.ru/archive/special\\_02/special\\_02\\_art6/](http://www.unido-russia.ru/archive/special_02/special_02_art6/) (Дата обращения: 05.05.2020).

Поступила в редакцию 19 января 2020 г.  
После доработки 20 мая 2020 г.  
Принята к публикации 2 июня 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 6, PP. 405–418.

## ANALYSIS OF THE USE OF RARE EARTH METALS IN FERROUS METALLURGY OF RUSSIA AND WORLD

A.I. Volkov<sup>1</sup>, P.E. Stulov<sup>1</sup>, L.I. Leont'ev<sup>1,2,3,4</sup>, V.A. Uglov<sup>1</sup>

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-405-418

<sup>1</sup>I.P. Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute of Metallurgy of the UB RAS, Ekaterinburg, Russia

<sup>3</sup>National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

<sup>4</sup>Scientific Council on Metallurgy and Metal Science of Russian Academy of Sciences (Department of Chemistry and Material Sciences), Moscow, Russia

### REFERENCES

**Abstract.** The analysis of the current state of production of rare earth metals (REM) in Russia and in the world was made. Information about REM production in different countries of the world and about new foreign projects for REM production and processing is provided. The article presents the balance of production, export and import of raw materials and products with REM, including scandium and yttrium, in Russia. The maximum volume of REM consumption in Russia was calculated taking into account imported products with REM. This data was compared with other countries, including the former USSR. Much attention is paid to the use of REM in metallurgy. Data on the influence of REM on the properties of cast iron and steel are presented. Information is given about the forms of REM used for their use in the Russian ferrous metallurgy. We have studied the structure of REM consumption in ferrous and non-ferrous metallurgy. On the example of two enterprises (one of them specializes in mass production, and the second – on production of special steels), the structure of REM consumption for steel alloying was studied by type and scope of its application. The development peculiarities of REM consumption in Russian ferrous metallurgy were investigated. The volume of consumption was calculated; data on imports of raw materials with REM for metallurgy and the producers of ferroalloys with REM in Russia is given. We have analyzed the spectrum of steel products with REM. A comparison of the consumption of REM in the metallurgy of Russia and foreign countries is presented. The reasons for insufficient consumption of REM in the Russian metallurgy are considered, an assessment is given on the change in production volumes of certain types of steel and cast iron, and recommendations are made on the growth of REM consumption in metallurgy.

**Keywords:** rare earth metals (REM), ferroalloys, ligatures, modifiers, cast iron, steel, market analysis, balance of production and consumption, ferrous metallurgy.

1. ITS 24-2017. *Proizvodstvo redkikh i redkozemel'nykh metallov* [Production of rare and rare earth metals]. Moscow: Byuro NDT, 2017, 202 p. (In Russ.).
2. Polyakov E.G., Nechaev A.V., Smirnov A.V. *Metallurgiya redkozemel'nykh metallov* [Metallurgy of rare earth metals]. Moscow: Metallurgizdat, 2018, 732 p. (In Russ.).
3. Yushina T.I., Petrov I.M., Grishaev S.I., Chernyi S.A. An overview of REM market and technologies for processing rare earth raw materials. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no. S1, pp. 577–607. (In Russ.).
4. *Godovoi otchet otkrytogo aktsionernogo obshchestva "Solikamskii magnievyy zavod" za 2018 god* [Annual report of OJSC “Solikamsk Magnesium Plant” for 2018]. Solikamsk: 2019, 91 p. (In Russ.).
5. *Mineral commodity summaries 2020. Ser.: Mineral Commodity Summaries*. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2020, 200 p.
6. *ERECON (2015) Strengthening the European Rare Earths Supply Chain: Challenges and Policy Options*. Kooroshy J., Tiess G., Tukker A., Walton A. eds. Available at URL: [https://www.mawitue.de/media/fm/homepage/news\\_seite/ERECON\\_Report\\_v05.pdf](https://www.mawitue.de/media/fm/homepage/news_seite/ERECON_Report_v05.pdf)
7. Gholz E. *Rare Earth Elements and National Security*. New York: Council on Foreign Relations® Inc. 2014, 20 p.
8. Arkhipova N.A., Levchenko E.N., Volkova N.M., Usova T.Yu. Model of development of the REM industry and market in Russia. *Razvedka i okhrana nedr*. 2014, no. 9, pp. 13–18. (In Russ.).
9. *Development of a Sustainable Exploitation Scheme for Europe's Rare Earth Ore Deposits. European REE market survey – Task 1.1.2*. Machacek E., Kalvig P. eds. GEUS and D'Appolonia, 2017, 163 p.
10. Golev A., Scott M., Erskine P.D., Ali S.H., Ballantyne G.R. Rare earths supply chains: Current status, constraints and opportunities. *Resources Policy*. 2014, vol. 41, pp. 52–59.
11. Binnemans K., Jones P.T. Rare earths and the balance problem. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2015, vol. 1, no. 1, pp. 29–38.
12. Non-Chinese rare earths. *Metallurgicheskii byulleten'*. 2018, no. 10-11, pp. 56–61. (In Russ.).
13. Gambogi J. Rare earths. In: *2016 Minerals Yearbook. U.S. Geological Survey*. 2019, pp. 60.1–60.16.

14. Volkov A.I. State and prospects of the use of rare metals in ferrous metallurgy. *Razvedka i okhrana nedr.* 2020, no. 3, pp. 11–18. (In Russ.).
15. Abramov A.M., Sobol' Yu.B., Galieva Zh.N., Gerya V.O., Semenov A.A. Mastering the REC separation technology of JSC "SMZ" on an automated cascade centrifugal extractors (model ETs-1000PB). *Tsvetnaya metallurgiya.* 2015, no. 4, pp. 53–58. (In Russ.).
16. Galieva Zh.N., Volobuev O.I., Yachmenev A.A., Igumnov M.S., Gerya V.O., Bydanov B.A., Dronov D.V., Semenov A.A. Universal technology for separation of rare earth concentrates (REC) in cascade centrifugal extractors: Development of technology, equipment and production. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii.* 2019, vol. 33, no. 1 (211), pp. 33–35. (In Russ.).
17. Akron: The secret of success. *Redkie zemli.* 2017, vol. 8, no. 1, pp. 76–81. (In Russ.).
18. Smyshlyaev V.Yu. On the pre-production mining of scandium from productive solutions of underground leaching at the Dalmatovskoe uranium deposit. *Gornyi zhurnal.* 2017, no. 8, pp. 28–32. (In Russ.).
19. Awakening of Russian scandium. *Metallurgicheskii byulleten'.* 2018, no. 4-5 (192), pp. 76–81. (In Russ.).
20. *Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'evykh resursov Rossii v 2018 godu* [State report on the state and use of mineral resources in Russia in 2018]. Moscow: Ministerstvo prirodnnykh resursov i ekologii RF, 2019, 426 p. (In Russ.).
21. Balaram V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers.* 2019, vol. 10, no. 4, pp. 1285–1303.
22. Kosynkin V.D., Trubakov Yu.M., Sarychev G.A. Past and future of rare earth production in Russia. *Metally Evrazii.* 2011, no. 5, pp. 40–53. (In Russ.).
23. Vereshchagin Yu.A., Emelina T.N. Russia's rare earth resource base: Past, present, and future. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'.* 2007, no. S1, pp. 24–34. (In Russ.).
24. *Statistical Compendium.* Special publication. U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1993, 417 p.
25. *Commodities at a glance. Special issue on rare earths.* New York, Geneva: United Nations conference on trade and development UNCTAD, 2014, no. 5, 58 p.
26. Schüler D. *Rare Earths – Facts & Figures.* Darmstadt: Öko-Institut, 2011, 7 p.
27. Romanova O.A., Pozdnyakova E.A. *Razvitie redkozemel'nogo proizvodstva: mirovye, natsional'nye i regional'nye tendentsii* [Development of rare earth production: Global, national and regional trends]. Ekaterinburg: Institut ekonomiki UrO RAN, 2011, 46 p. (In Russ.).
28. Ganguli R., Cook D.R. Rare earths: A review of the landscape. *MRS Energy & Sustainability.* 2018, vol. 5, article e9.
29. Seregina I.F., Volkov A.I., Ossipov K., Bolshov M.A. Characterization of REE-Nb ores by a combination of spectrochemical techniques. *Spectrochimica Acta Part B – Atomic Spectroscopy.* 2018, vol. 148, pp. 172–182.
30. Suli L.M., Ibrahim W.H.W., Aziz B.A., Deraman M.R., Ismail N.A. A review of rare earth mineral processing technology. *Chemical Engineering Research Bulletin.* 2017, vol. 19, pp. 20–35.
31. Usova T.Yu. Foreign technologies for separate extraction of rare earth elements. *Redkie zemli.* 2018, vol. 9, no. 1, pp. 136–147. (In Russ.).
32. Strekopytov V. Rostec: rare-earth direction. *Redkie zemli.* 2017, vol. 8, no. 1, pp. 82–91. (In Russ.).
33. Melent'ev G.B. Russian rare earths: Prospects and priorities. *Redkie zemli.* 2015, vol. 4, no. 1, pp. 56–60. (In Russ.).
34. Naumov A.V. Review of the world market of rare-earth metals. *Russian Journal of Non-ferrous Metals.* 2008, vol. 49, no. 1, pp. 14–22.
35. Guyonnet D., Planchon M., Rollat A., Escalon V., Tuduri J., Charles N., Vaxelaire S., Dubois D., Fargier H. Material flow analysis applied to rare earth elements in Europe. *Journal of Cleaner Production.* 2015, vol. 107, pp. 215–228.
36. Fei Pan, Jian Zhang, Hao-Long Chen, Yen-Hsun Su, Chia-Liang Kuo, Yen-Hao Su, Shin-Hau Chen, Kuan-Ju Lin, Ping-Hung Hsieh, Weng-Sing Hwang Effects of rare earth metals on steel microstructures. *Materials (Basel).* 2016, vol. 9, no. 6, pp. 417.
37. Svistunova T.V., Bobkova O.S., Belyasov B.D. Effect of scandium on structure and properties of corrosion-resistant steels. *Metal Science and Heat Treatment volume.* 2008, vol. 50, no. 5-6, pp. 214–219.
38. Drapala J., Brozova S., Szurman I., Konecna K., Kostiukova G., Vontorova J., Jonsta P., Sobotkova K. Influence of selected rare earth metals on structural characteristics of 42CrMo4 steel. *Metallurgija.* 2016, vol. 55, no. 4, pp. 757–760.
39. Collins J.F., Calkins V.P., McGurty J.A. *Applications of rare earths to ferrous and non-ferrous alloys.* Cincinnati: General Electric, 1959, 29 p.
40. Seregin A.N. Application of REM alloys to improve the quality of mass metallurgical products. In: *Aktual'nye voprosy polucheniya i primeneniya RZM-2015: sbornik materialov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Moskva, 25 iyunya 2015 g.* [Actual Issues of Obtaining and Applying of REM-2015: Proc. of Int. Sci. – Pract. Conf., Moscow, June 25, 2015]. Moscow: OAO "In-t "GINTsVETMET". 2015, pp. 27–33. (In Russ.).
41. Stulov P.E., Seregin A.N., Korzun V.K. Development of processing technology for rare earth raw materials with obtaining ligatures. In: *Aktual'nye voprosy polucheniya i primeneniya RZM-2015: sbornik materialov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Moskva, 25 iyunya 2015 g.* [Actual Issues of Obtaining and Applying of REM-2015: Proc. of Int. Sci. – Pract. Conf., Moscow, June 25, 2015]. Moscow: OAO "In-t "GINTsVETMET". 2015, pp. 161–163. (In Russ.).
42. Primerov S.N., Vikhlyayev V.B., Likhoshva V.P. Complex silicon-free REM ligatures for ladle treatment of iron-carbon melts. *Liteinoe proizvodstvo.* 1984, no. 11, pp. 9–10. (In Russ.).
43. Ryabchikov I.V., Mizin V.G., Lyakishev N.P., Dubrovin A.S. *Ferrosplavy s redko- i shchelochemel'nyimi metallami* [Ferroalloys with rare and alkaline earth metals]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 272 p. (In Russ.).
44. Emelina T., Vereshchagin Yu. Rare earth elements: Metallurgical prospects. *Ural'skii rynek metallov.* 2007, no. 5, pp. 69–73. (In Russ.).
45. Golubtsov V.A., Dynin A.Ya., Rogozhina T.V., Ryabchikov I.V., Usmanov R.G. Application of the company NPP output at modification of steel. *Lit'e i metallurgiya.* 2009, no. 3(52), pp. 245–253. (In Russ.).
46. Nazaratina V.V., Degtyarev A.V., Egorova M.A., Novikov V.A., Sverchokov S.N. *Modifikator dlya stali* [Modifier for steel]. Patent RF no. 2530190. *Byulleten' izobretenii.* 2014, no. 28. (In Russ.).
47. Zenkin R.N., Val'ter A.I. Modifiers and technologies for ladle treatment of high-strength cast iron. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskoe nauki.* 2014, Issue 11, Part 1, pp. 30–41. (In Russ.).
48. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V., Marintsev S.N. etc. The use of rare earth metals in pipe steel production. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya".* 2006, no 4, pp. 51–53. (In Russ.).
49. Golubtsov V.A., Dynin A.Ya., Shub L.G. Microcrystalline modifiers of the Insteel® series – the way to increase the service life of pipes. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya".* 2008, no. 1, pp. 55–58. (In Russ.).
50. Litvinova T.E. *Poluchenie soedinenii individual'nykh RZM i poputnoi produktsii pri pererabotke nizkokachestvennogo redko-metal'nogo syr'ya: dis. ... doktora tekhn. nauk* [Obtaining compounds of individual REM and pre-products at processing of low-quality rare-metal raw materials: Dr. Tech. Sci. Diss.]. St. Petersburg: 2014, 318 p. (In Russ.).
51. Consumption of REM in Russia amounted to 1200 tons in 2018. *Metallurgicheskii byulleten'.* 2019, no. 4-5, pp. 35–36. (In Russ.).
52. Zainullin E. Hankering for a change of fields. Rostec withdraws from rare earth project. *Gazeta "Kommersant".* no. 144, 14.08.2019, p. 1. (In Russ.).
53. Charalampides G., Vatalis K.I., Apostoplos B., Ploutarch-Nikolas B. Rare earth elements: Industrial applications and economic dependency of Europe. *Procedia Economics and Finance.* 2015, vol. 24, pp. 126–135.

54. Khramenkov S.V., Aliferenkov A.D., Primin O.G. *Truby iz vysokoprochnogo chuguna dlya sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya* [High-strength cast iron pipes for water supply and drainage systems]. Moscow: MGSU, 2015, 192 p. (In Russ.).
55. Gnatush V.A., Doroshenko V.S. Trends in the global market of cast iron with spherical graphite. *Protsessy lit'ya*. 2017, no. 2 (122), pp. 70–78. (In Russ.).
56. Dibrov I.A. *Sostoyanie i perspektivy liteinogo proizvodstva Rossii: Vystuplenie na XI S"ezde liteishchikov v Ekaterinburge 16-19 sentyabrya 2013 g.* [State and prospects of foundry production in Russia]. Electronic resource. Available at URL: [http://www.unido-russia.ru/archive/special\\_02/special\\_02\\_art6/](http://www.unido-russia.ru/archive/special_02/special_02_art6/) (Accessed 05.05.2020). (In Russ.).

**Information about the authors:**

*A.I. Volkov*, Cand. Sci. (Chem.), Deputy Director of the Centre of New Metallurgical Technologies (rhenium@list.ru)

*P.E. Stulov*, Junior Researcher (pavel1411@rambler.ru)

*L.I. Leont'ev*, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician, Adviser of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher

*V.A. Uglov*, Cand. Sci. (Eng.), Deputy General Director

Received January 19, 2020

Revised May 20, 2020

Accepted June 2, 2020

---