

УДК 669.27/29:669.054.8

Г.А. КОЛОБОВ⁽¹⁾, профессор-консультант, кандидат технических наук
В.К. ЛИСИЦА⁽¹⁾, профессор, доктор технических наук
Ю.В. МОСЕЙКО⁽¹⁾, доцент, кандидат педагогических наук
В.В. ПАВЛОВ⁽²⁾, главный инженер, кандидат технических наук
А.К. ПЕЧЕРИЦА⁽¹⁾, магистрант

ИЗВЛЕЧЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ОТХОДОВ МАГНИТНЫХ СПЛАВОВ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИХ

Сообщение 2. Отходы сплавов системы «неодим-железо-бор»

⁽¹⁾ Запорожская государственная инженерная академия

⁽²⁾ Запорожский металлургический опытно-промышленный завод ПАО «Институт титана»

Выполнен обзор различных технологий извлечения неодима и других редкоземельных элементов из лома и отходов сплава на основе системы Nd-Fe-B и постоянных магнитов, изготовленных из этого сплава.

Ключевые слова: сплав NdFeB, постоянные магниты, скрап, шлифотходы, шлак, шлам, отделение железа, извлечение РЗМ

Введение. Постоянные магниты, содержащие редкоземельные металлы (самарий, неодим, диспрозий, празеодим, тербий и др.), особенно сплавы на основе системы Nd-Fe-B, превосходят другие магнитные материалы (сплавы альнико, ферриты бария и стронция и др.) по величине магнитной энергии на единицу объема и по величине коэрцитивной силы. Сплав «неодим-железо-бор» для изготовления магнитов используется в стехиометрическом соотношении $Nd_2Fe_{14}B$, что соответствует следующему составу сплава по массе, %: 25...32 Nd; 65...73 Fe; ~ 1,0 B [1]. Одним из наиболее широко применяемых редкоземельных металлов (РЗМ) является неодим (потребление 20 тыс.т/год, третья позиция после церия и лантана), основное количество которого используют для изготовления постоянных магнитов [2]. Высокоочищенный оксид неодима для производства магнитов получают, в частности, путем экстракционного разделения группового редкоземельного концентрата, выделенного из фосфогипса – отвального продукта производства фосфорной кислоты [3].

Для производства высокоэнергетических постоянных магнитов на основе системы Nd-Fe-B [4] разработана «сухая» фторидная технология, заключающаяся во фторировании исходного сырья (оксидов) элементарным фтором, кальциетермическом внепечном восстановлении фторидов с получением слитков сплавов и лигатур и изготовлении магнитов методом порошковой металлургии с использованием механического или гидридного измельчения слитков.

Отходы сплавов системы Nd-Fe-B. При производстве магнитов из сплава NdFeB до 40 % материала идет в отходы [5]. Для изготовления изделий (магнитов) используют механическую обработку заготовки, при этом большая ее часть вследствие высокой хрупкости сплава переходит в отходы, содержащие до 30 % неодима [6]. Отходы, образующиеся при изготовлении NdFeB-магнитов, представлены скрапом (кусковые отходы, стружка, порошки), шлифотходами и шламами.

Переработка отходов. При переработке отходов сплава NdFeB и изделий из него ставится задача эффективного извлечения самого ценного компонента сплава – неодима, для чего, в первую очередь, должна быть решена проблема отделения железистой составляющей сплава. Разделение неодима и железа выполняют разными методами, например пирометаллургическими. Так, с этой целью в работе [7] предложено вести плавку РЗМ-содержащего шлама в углеродистом тигле при температуре 1550 °С. При этом металлическое железо образует сплав, а РЗМ остаются в форме оксидного шлака, легко отделяемого от металла. Потери РЗМ со сплавом незначительны. В работе [8] отходы сплава NdFeB сплавляли с B_2O_3 в тигле из бора, перегревали смесь на 100 градусов выше температуры ликвидуса (до 1380 °С), а затем охлаждали в токе аргона до комнатной температуры. Исследования показали, что из расплава кристаллизуются только две фазы: α -Fe и Fe_2B , а неодим практически весь остается в стекле. В исходном $Nd_2Fe_{14}B$ содержание неодима составляло 25,50 %, железа – 72,61 %, бора – 1,08 %, а в получен-

ном борном стекле содержание неодима составило 25,8 %, железа – 0,23 %.

Однако в большинстве случаев задача разделения неодима и железа решается на стадии гидрометаллургии. Для растворения скрапа *NdFeB*-магнитов в работе [9] были испытаны четыре реагента: *NaOH*, *HCl*, *HNO₃*, *H₂SO₄*. Показано, что при оптимальном режиме выщелачивания серная кислота позволяет извлечь 75,41 % неодима. За счет повышения pH удалось осадить неодим селективно, оставив железо в растворе. Рентгеноспектральный анализ показал, что осажденный гидроксид находится в форме *NdOOH* и *Nd(OH)₃*.

Согласно патенту [10], сплав, содержащий РЗМ и железо, нагревали до температуры 200...700 °С в течение 0,5...2,0 ч для окисления железа. После охлаждения сплав измельчали до 50...200 меш и выщелачивали РЗМ крепкой кислотой (концентрация 2...5 н.), например *HCl*, при комнатной температуре в течение 1 ч. Затем раствор фильтровали и к фильтрату добавляли щавелевую кислоту и *Na₂CO₃* для осаждения РЗМ в виде оксалатов. Осадок отделяли фильтрацией, сушили и обжигали при температуре 800...1000 °С с получением оксидов РЗМ. Предложенный способ позволил снизить расход реагентов и достигнуть высокой степени извлечения РЗМ.

Чаще всего для выщелачивания отходов сплава *NdFeB* применяют серную кислоту. Так, в работе [11] использовали режим растворения отходов в 34...36 %-ой *H₂SO₄*, которое сопровождается образованием осадка в виде сульфатного редкоземельного концентрата и железосодержащего раствора. Была изучена кинетика процесса и определены оптимальные условия, при которых достигается высокая степень разделения компонентов. Предложены наиболее рациональные приемы перевода сульфатов редкоземельных элементов во фторидные соединения и гидроксиды. Способ по патенту [12] включает измельчение лома сплава системы *Nd-Pr-Fe-Al-B* в порошок, растворение его в серной кислоте, выделение из раствора добавлением 99,5 %-го этанола кристаллического осадка и последующий переплав его в электропечи. В приведенном примере исходный продукт содержал, %: 31,42 *Nd*; 0,45 *Pr*; 65,39 *Fe*; 0,25 *Al*; 1,27 *B*, а полученный после переплавки сплав имел следующий состав, %: 83,34 *Nd*; 0,53 *Pr*; 0,69 *Fe*; 0,3 *Al*; *B* < 0,01, остальное – кислород.

Селективное окисление скрапа магнитного сплава *NdFeB* в токе паров *H₂-H₂O* позволяет получить смесь железо – *Nd₂O₃*, однако эффек-

тивное разделение смеси на отдельные компоненты магнитной сепарацией или выщелачиванием в разбавленной кислоте затруднено из-за тонкого прорастания зерен. В работе [13] была предложена более удачная схема. Скрап растворяли в 2М *H₂SO₄* при комнатной температуре без агитации. Из раствора добавлением *NaOH* или *NH₄OH* осаждали двойные соли *Nd₂(SO₄)₃·Na₂SO₄·6H₂O* или *Nd₂(SO₄)₃·(NH₄)₂SO₄·8H₂O*. Осадок легко отфильтровывали от железосодержащего раствора, который обрабатывали *H₂O₂* и *NH₄OH* с целью осаждения ярозита. После фильтрации из раствора, содержащего ~1 г/л бора, добавлением цинкового порошка извлекали бор, осаждая гидратированный борат цинка. Двойные соли обрабатывали раствором *HF*, переводя их в *NdF₃*. Сквозное извлечение неодима составило 80 %.

В патенте [14] предложен способ переработки шлифотходов, образующихся в производстве постоянных магнитов, который включает растворение отходов в серной кислоте, выделение химическим осаждением двойных солей РЗМ и натрия и их отмывку. Затем выполняют последовательно конверсию двойных солей в гидроксиды РЗМ и далее в оксалаты. После сушки и прокаливания оксалатов получают оксиды с содержанием суммы РЗМ не менее 99 %. Маточные растворы после осаждения двойных солей перерабатывают с получением железистого и кобальтового кеков.

В других случаях для выщелачивания отходов и отделения железа применяют азотную, соляную и другие кислоты. Для извлечения неодима и диспрозия из шлама магнитов системы *Nd-Fe-B-Dy* использовали азотную кислоту [15]. Состав шлама, %: 35,1 *Nd*; 29,5 *Fe*; 1,1 *Dy*; 0,5 *B*, основная его минеральная часть представлена *Nd(OH)₃* и *Fe₂O₃*. При выщелачивании шлама в растворе 1М *HNO₃* + 0,3М *H₂O₂* за 10 мин в раствор переходят 98 % неодима и 81 % диспрозия при извлечении менее 15 % железа. Очистку раствора от железа выполняли гидролизом при pH = 3, осаждая его в форме *Fe(OH)₃*. РЗМ осаждали щавелевой кислотой с выходом оксалатов неодима 91,5 % и диспрозия 81,8 %. Оксалаты прокаливали при температуре 800 °С, получая *Nd₂O₃* и *Dy₂O₃* чистотой 68 %. Общее извлечение неодима составило 69,7 %, диспрозия – 51 %.

Другой способ переработки шлифотходов от производства постоянных магнитов системы *Nd-Fe-B* предложен в патенте [16]. Способ включает окисление шлифотходов при температуре 550...650 °С в атмосфере воздуха для раз-

рушения кристаллической решетки $Nd_2Fe_{14}B$ с образованием Fe_2O_3 , Nd_2O_3 , Fe_2B и удалением влаги и масла. Затем получают безводные фториды РЗМ и выполняют их металлотермическое восстановление. При этом после окисления шлифотходов проводят выщелачивание из них РЗМ азотной кислотой концентрации 1...2 моль/л при температуре 20...80 °С. Полученные нитратные растворы, содержащие РЗМ и примесные элементы, обрабатывают раствором муравьиной кислоты с выделением формиатов РЗМ в виде осадка, очищенного от примесных элементов, которые включают железо, алюминий, никель, кобальт, медь и другие переходные металлы. Техническим результатом изобретения является регенерация РЗМ (Nd , Pr , Dy , Tb) из отходов и получение РЗМ-содержащего сырья для повторного использования в производстве редкоземельных постоянных магнитов.

В способе извлечения неодима из отходов производства $NdFeB$ -магнитов (шлака и лома) [17] шлак, содержащий неодим, обрабатывают сульфаматной кислотой (NH_2SO_3H) при $pH = 2...3$ под анодным потенциалом. При этом железо осаждается на катоде, а в сульфаматный раствор добавляют HF , получая осадок NdF_3 , который высушивают в печи. Сульфаматная кислота возвращается в электролизер. Лом магнитов $NdFeB$ растворяют по другой схеме. Его дробят в растворе $NaOH$, получая Nd_2O_3 и железный порошок, который отделяют магнитной сепарацией. Черновой Nd_2O_3 обрабатывают уксусной кислотой при $pH = 4,7$, переводя неодим в раствор в виде $Nd(CH_3COO)_3$. Раствор выпаривают, получая кристаллы ацетата неодима, который при обработке плавиковой кислотой превращается в NdF_3 . Трифторид неодима сушат, получая конечный продукт с 3 % влаги.

В работе [18] рассмотрены три процесса извлечения РЗМ из скрапа магнитов $NdFeB$. Измельченный скрап выщелачивают соляной кислотой, из раствора осаждают железо в форме гетита ($FeOOH$) и кобальт в форме сульфида. Очищенный раствор, содержащий РЗМ, подвергают обработке по следующим вариантам. По первому варианту РЗМ (Nd , Dy , Pr , Tb) осаждают в коллективный концентрат щавелевой кислотой. По второму варианту выполняют предварительное разделение РЗМ на легкие (Nd , Pr) и тяжелые (Dy , Tb) сульфатом натрия с извлечением > 90 %. По третьему варианту РЗМ разделяют жидкостной экстракцией экстрагентом РС-88А в девять ступеней.

Солянокислотное выщелачивание, использованное в работе [19], позволило получить на

выходе технологии переработки отходов производства и скрапа магнитов $NdFeB$ оксид неодима высокой степени чистоты. Этот конечный продукт был получен через промежуточную стадию получения оксалата неодима. В ранее упомянутой работе [5] был изучен процесс отделения РЗМ от примесей посредством использования низкой растворимости их оксалатов. Найден оптимальный режим осаждения РЗМ щавелевой кислотой: температура 80 °С, $pH = 1,5...2,0$. После обжига осадка при температуре 800 °С в течение 1 ч получили оксиды РЗМ чистотой 99,27 %. По патенту [20] для извлечения неодима из скрапа $NdFeB$ -постоянных магнитов предлагается растворить скрап в 4...5 н. соляной кислоте, отфильтровать полученный раствор и обработать его при температуре 80...95 °С HF или NH_4F в количестве, превышающем стехиометрически необходимое для получения NdF_3 в 1,0...1,2 раза. Полученный в осадке NdF_3 промывают водой, нейтрализуют добавкой щелочи и высушивают. Этот способ обеспечивает высокое извлечение неодима.

При солянокислотном выщелачивании скрапа постоянных магнитов, изготовленных из сплава $NdDyFeB$, общее извлечение РЗМ превысило 92 %, при этом был получен Dy_2O_3 чистотой выше 99 %. Разделение неодима и диспрозия выполняли методом жидкостной экстракции [21]. В работе [22] установлены оптимальные концентрация соляной кислоты и отношение Т:Ж для выщелачивания шлама $NdFeB$. Определен pH , необходимый для совместного осаждения композитного порошка, в котором суммарное содержание Nd , Pr , Co и Fe составляло более 99,4 % и соответствовало требованиям для рециклированных магнитных порошков.

На Сибирском химическом комбинате (г. Северск, Российская Федерация) производят сплавы $NdFeB$ и лигатуру $DyFe$ по внепечной фторидной технологии, а магниты – методом порошковой технологии [23]. При этом образуются следующие отходы производства: шлифотходы, отходы индукционного переплава, осыпи, сметки и др. Наиболее простая и короткая схема переработки этих отходов основана на использовании «сухой» фторидной технологии, которая обеспечивает полный возврат РЗМ, железа и легирующих добавок в технологический цикл производства сплавов и лигатур. Проблема переработки борсодержащих отходов на данном предприятии решена с использованием «мокрых» технологических схем. Достоинство «мокрых» схем переработки металлических отходов заключается в концентрировании РЗМ путем от-

деления бора, железа (полного или частичного) и лимитирующих примесей, таких как никель, хром, алюминий, кремний, медь и др. Оксид железа после его очистки от немагнитных примесей абразивного материала (Al_2O_3 , SiC) фторируют элементарным фтором, а образовавшийся фторид направляют на операцию восстановительной плавки для получения сплавов и лигатур.

В работе Томского политехнического университета [24] указывается, что несомненным преимуществом вышеуказанной технологии является отсутствие водной стадии и возможность использования переработанных продуктов для внепечного кальциетермического получения сплавов и лигатур без разделения РЗМ и других ценных компонентов на индивидуальные вещества. В этой же работе для извлечения РЗМ из отходов, образующихся при шлифовании сплава $Nd-Fe-B$, предлагается следующая технология: классификация отходов электрокорунда на две фракции: $-0,4$ мм и $+0,4$ мм; трехступенчатая магнитная сепарация отходов фракции $-0,4$ мм на барабанном сепараторе; окисление отходов на воздухе при температуре $400...500$ °С в течение 1 ч с получением смеси оксидов; фторирование смеси оксидов РЗМ, железа, алюминия и др. элементарным фтором при температуре $350...450$ °С; восстановление смесей фторидов РЗМ, железа и алюминия кальцием с получением лигатуры $NdFeAl$, которую можно использовать как для производства слитков сплавов $NdFeB$ путем индукционного переплава, так и для твердофазного легирования на операции тонкого помола при получении магнитов. Выход лигатур в слиток составляет $80...92$ %.

В некоторых случаях железо не отделяют, а получают коллективный продукт для повторного использования в качестве материала в производстве магнитного редкоземельного сплава. Для этой цели используют пирометаллургические технологии. Так, способ переработки отходов производства постоянных магнитов [25] заключается в плавке скрапа состава, %: 32 Nd ; 67 Fe ; 1 B в индукционной печи в алуновом тигле. Температура – 1550 °С, атмосфера – аргон. Неметаллические включения всплывают на поверхность расплава в виде дрессов (состав: Nd_2O_3 , Fe_2O_3 , NdN) и при выливке сплава остаются на стенках и дне тигля. Примесный состав скрапа/сплава (в млн⁻¹): 4950/210 O_2 ; 500/43 N_2 ; 190/46 H_2 ; 380/350 C . Чистота полученного сплава удовлетворяет требованиям к материалу для изготовления постоянных магнитов.

Способ переплавки лома магнитов $RFeB$ (где $R - Nd, Pr, Tb, Dy, Y$), по патенту [26], состоит из расплавления в печи металлической шихты, не содержащей РЗМ (электролитное железо, FeB , кобальт, сплавы алюминия или их смеси) и введения в расплав шихты, содержащей РЗМ ($Nd-Fe$ и $Dy-Fe$) и $0,1...50$ % шихты из лома редкоземельных магнитов и/или шлама. Затем в этот расплав добавляют $0,01...30$ % галогидных флюсов, содержащих по крайней мере один щелочной металл, щелочно-земельный металл и редкоземельный металл с размером частиц $1...50$ мкм, с последующим плавлением всего содержимого тигля. Плавку ведут в инертной атмосфере при температуре $1500...1800$ °С.

Электрошлаковый переплав для переработки отходов производства $NdFeB$ -магнитов предложен в работе [27]. Телом нагрева является шлак, содержащий CaF_2 , $CaCl_2$, а также хлориды или фториды РЗМ. Для этой цели может быть использован шлак, образующийся при кальциетермическом восстановлении соединений РЗМ. Верхний электрод прессуют из скрапа, хотя может быть использован и нерасходуемый электрод из железа, тантала, молибдена или графита (в этом случае скрап подают в зону плавления шнековым питателем). В результате переплавки содержание азота и кислорода в полученном материале снижается на $1...2$ порядка, и он может быть повторно использован для производства постоянных магнитов.

В патенте [28] предложен процесс, который включает в себя обжиг отходов сплава $FeNdCoB$ в восстановительных условиях с добавками полиэфирных или полиамидных смол с последующим разложением огарка в присутствии органических реагентов типа тетралина, нафталина, бифенила, 2-гексанона и т.п. Последнюю операцию выполняют при температуре выше 230 °С и пониженном давлении в атмосфере инертных газов (азота, гелия или аргона). Отличительная особенность метода – минимальная степень окисления регенерированных магнитных порошков.

Шлифотходы, образующиеся при производстве магнитов, могут быть непосредственно использованы в чугунолитейном производстве для получения высокопрочного чугуна в качестве составной части сфероидизирующих добавок подобно модифицирующим лигатурам типа ФС-РЗМ (здесь ФС – ферросилиций) [29]. Для этого шлам перед присадкой в расплав просушивали сначала при комнатной температуре, а затем в сушильном шкафу при температуре 100 °С. Наиболее перспективной оказалась присадка не-

одимсодержащего шлама в компактированном виде.

Обычная технология извлечения неодима из скрапа редкоземельных сплавов и магнитов заключается в кислотном растворении отходов, жидкостной экстракции и восстановлении полученного соединения до металла. Приведем два примера осуществления этой технологии. В работе [30] предложен короткий и эффективный способ, заключающийся в электровосстановлении железа из раствора выщелачивания скрапа и селективном извлечении неодима из очищенного от железа раствора жидкостной экстракцией реагентом P507. В работе [31] шлифотходы, образующиеся в производстве постоянных магнитов на основе сплава $NdFeB$, были переработаны по осадительной технологии на оксид и фторид неодима чистотой $\sim 99\%$, которые являются исходным сырьем для получения металлического неодима. Для производства Nd_2O_3 чистотой $99,98\%$ необходима дополнительная экстракционная очистка.

Переработка отходов производства магнитных сплавов $NdFe(Co)B$ и лигатур РЗМ- Fe по фторидной технологии с применением магнитной сепарации рассмотрена в работе [32]. Показана принципиальная возможность получения магнитной фракции в виде РЗМ-содержащего концентрата с извлечением РЗМ до 60% от остаточного содержания в шлаках восстановительной плавки фторидов металлов.

В лаборатории «Ames» (США) предложен простой и дешевый способ экстракции неодима

из скрапа расплавленным магнием [6]. Скрап измельчают и засыпают в расплавленный магний при температуре $800\text{ }^\circ\text{C}$. При этом неодим растворяется в сплаве, а железо и бор остаются в твердом виде. Сплав $Mg-Nd$ используют в литейном производстве. Хотя в состав сплава входит всего 2% неодима, его доля в стоимости сплава составляет $\sim 40\%$.

Процесс извлечения неодима из скрапа $NdFeB$ -магнитов экстракцией из расплава изучали также в работе [33]. Изменяемые параметры при выдержке скрапа при температуре $800\text{ }^\circ\text{C}$: время выдержки и крупность скрапа. Было установлено, что при увеличении времени выдержки до 50 мин и крупности скрапа 5 мм количество извлеченного неодима возросло до $24,2\%$.

Интересно, что автомобильный скрап содержит от $0,13$ до $0,29$ кг неодима на 1 т скрапа из-за наличия в нем РЗМ-магнитов. В работе [34] приведено также содержание других лантаноидов (Pr , Dy , Tb) в тонне измельченного автомобильного скрапа и оценена их стоимость.

Заключение. Отходы производства и применения магнитного сплава $NdFeB$ являются ценным вторичным сырьем редкоземельных металлов. Для их извлечения используют такие пирометаллургические технологии, как высокотемпературное фторирование, кальциетермическое восстановление, экстракция из расплава, обжиг, плавка, выщелачивание, гидролиз, жидкостная экстракция, электролиз, химическое осаждение.

Библиографический список

1. Колобов, Г. А. Извлечение редкоземельных металлов из отходов магнитных сплавов и изделий из них. Сообщение 1. Отходы сплавов системы самарий-кобальт и отработанные аккумуляторные батареи [Текст] / Г. А. Колобов, Н. Н. Ракова, Ю. В. Мосейко и др. // *Металургія. Наукові праці Запорізької державної інженерної академії.* – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2016. – Вип. 2 (36). – С. 36-42.
2. Петров, И. М. Перспективы развития мирового рынка РЗМ [Текст] / И. М. Петров // *Актуальные вопросы получения и применения РЗМ-2015: сборник материалов Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 25 июня 2015.* – С. 13-15.
3. Абрамов, А. М. Исследование по получению оксида неодима для производства магнитов из ГРЗК, выделенного из фосфогипса [Текст] / А. М. Абрамов, Ж. Н. Галиева, А. В. Галанцев, А. А. Семенов // *Актуальные вопросы получения и применения РЗМ-2015: сборник материалов Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 25 июня 2015.* – С. 88-90.
4. Софронов, В. Л. Фторидная технология получения сплавов на основе редкоземельных металлов для производства высокоэнергетических постоянных магнитов [Текст] / В. Л. Софронов, А. С. Буйновский, А. Н. Жиганов и др. // *Цветные металлы.* – 2012. – № 1. – С. 23-27.
5. Yin, Xiaowen. Recycle rare earth elements from $NdFeB$ waste with oxalate precipitation method [Text] / Xiaowen Yin, Min Liu, Weihong Lai, Chuanbob Dong et al. // *Chin. J. Rare Metals.* – 2014. – Vol. 38, No. 6. – Pp. 1093-1098.
6. Method of production of neodymium from scrap of magnets [Text] // *JOM: J. Miner. Metals and Mater. Soc.,* 2001. – Vol. 53, No. 7. – P. 4.
7. Nakamoto, M. Extraction of rare earth elements as oxides from a neodymium magnetic sludge [Text] / M. Nakamoto, K. Kubo, Y. Katayama et al. // *Met. and Mater. Trans.* – 2012. – Vol. 43, No. 3. – Pp. 468-476.

8. **Saito, T.** Extraction (production) of neodymium from wastes alloys Nd-Fe-B by melting with making glassy slag [Text] / T. Saito, H. Sato, S. Ozawa etc. // *J. Alloys and Compounds*, 2003. – Vol. 353, No. 1-2. – Pp. 189-193.
9. **Lee, Ching-Hwa.** Selective Leaching Process for Neodymium Recovery from Scrap Nd-Fe-B Magnet [Text] / Ching-Hwa Lee, Yu-Jung Chen, Ching-Hua Liao, Srinivasa R. Popuri et al. // *Met. and Mater. Trans. A.* – 2013. – Vol. 4, No. 13. – Pp. 5825-5833.
10. **Pat. 60-222870 Japan.** Method of production of rare earth elements from alloy / Fudzii CH. Publish. 1987.
11. **Герасимова, Л. Г.** Сульфатный способ переработки РЗМ-отходов [Текст] / Л. Г. Герасимова, А. И. Николаев // *Цветные металлы.* – 2012. – № 3. – С. 83-86.
12. **Pat. 62-174785 Japan.** Method of making of neodymium from scrap / Ya. Matsumoto, I. Takachasi. Publish. 1989.
13. **Lyman, I. W.** Переработка скрапа магнитов неодим-железо-бор / Rept. Invest. [Text] / I. W. Lyman, G. R. Palmer // *Bur. Mines US. Dep. Inter.*, 1993. – Vol. 9481. – Pp. 1-28.
14. **Пат. 2431691 Рос. Федерация, МПК С 22 В 59/00, С 22 В 3/08.** Метод переработки шлифотходов от производства постоянных магнитов / Н. В. Зоц, Ю. Г. Глушенко, С. В. Шестаков и др.; заявитель и патентообладатель ОАО «Российские редкие металлы». – № 2010120490/02; заявл. 13.05.10; опубл. 20.10.11.
15. **Rabatho, J. P.** Recovery of Nd and Dy from rare earth magnetic waste sludge by hydrometallurgical process [Text] / J. P. Rabatho, W. Tongamp, Y. Takasaki etc // *J. Mater. Cycl. and Waste Manag.* – 2013. – Vol. 15, No. 2. – Pp. 171-178.
16. **Пат. 2469116 Рос. Федерация, МПК С 22 В 59/00.** Способ переработки шлифотходов от производства постоянных магнитов / В. Л. Софронов, В. В. Догаев, А. С. Буйновский и др.; заявитель и патентообладатель НИЯУ «МИФИ». – № 2011109473/02; заявл. 14.03.2011; опубл. 10.12.2012.
17. **Pat. 5429724 USA.** Method of production of neodymium / Bernard Greenberg, Pure-Etch Co. Publish. 1995.
18. **Elwert, Tobias.** Hydrometallurgical recycling of sintered NdFeB magnets [Text] / Tobias Elwert, Daniel Goldmann, Florian Schmidt, Roberto Stollmaier // *Erzmetall.* – 2013. – Vol. 66, No. 4. – Pp. 209-219.
19. **Копырин, А. А.** Получение оксида неодима из отходов производства постоянных магнитов на основе неодим-железо-бор [Текст] / А. А. Копырин, Н. В. Зоц, Д. С. Андреев // *Химическая технология: тезисы докладов междунар. конф. по химической технологии ХТ 07, Москва-Ташкент.* – Т. 4. – М. : ЛЕНАНД, – 2007. – С. 339-340.
20. **Pat. 3207825 Japan.** Method of secession and production of rare-earth metals from raw materials containing rare-earth metals and iron [Text] / M. Tokuda. Publish. 1991.
21. **Yi-jun, Wang.** Study and praktice of selective lixiviation by hydrochloric acid rare-earth metals from scrap NdFeB-alloys [Text] / Wang Yi-jun, Liu Yu-hui, Weng Guo-ging et al. // *Rare Metals and Cem. Carbides.* – 2007. – Vol. 35, No. 2. – P. 25-27.
22. **Lai, Weihong.** Recovery of a composite powder from NdFeB slurry by co-precipitation [Text] / Weihong Lai, Min Liu, Chunyan Li, Hongli Suo etc. // *Hydrometallurgy.* – Vol. 150. – 2014. – Pp. 27-33.
23. **Анисимов, Л. Д.** Комплексная переработка техногенного сырья в производстве редкоземельных магнитов [Текст] / Л. Д. Анисимов, В. В. Лазарчук, А. Н. Качуровский и др. : материалы 6-й науч.-техн. конф. СХК, 17-20.10.2000. – Северск: Изд-во НИКИ СХК, 2001. – Ч. 1. – С. 220-224.
24. **Буйновский, А. С.** Переработка отходов производства магнитов на основе сплавов Nd-Fe-B фторидным методом [Текст] / А. С. Буйновский, В. Л. Софронов, Ю. П. Штефан и др. / *Редкоземельные металлы : переработка сырья, производство соединений и материалов на их основе: тезисы докладов Междунар. конф.* – Красноярск, 1995. – С. 99-101.
25. **Pat. 5087291 USA.** Method of reduction of scrap for transient trare-earth metals / Schmidt F., Peterson D., Wheelock J. etc. Оpubл. 1992.
26. **Pat. 6960240 USA.** Melting of scrap of rare-earth magnate and/of sludge magneticgenerating alloys and sintered rare-earth magnites / Shin-Etsy Chemical Co., Ltd, K. Hirota, T. Minowa. Publish. 2005.
27. **Pat. 5174811 USA.** Method of making of scrap of rare-earth metals / Schmidt L. Publish. 1992.
28. **Pat. 6533837 USA.** Method of recovering and recycling magnetic powder from rare earth bond magnet / Matsushita Electric Industrial Co., Ltd, Y. Yamagata, F. Yamashita. No. 09/677589; pat. 03.10.2000; Publish. 18.03.2003. Prior. 04.10.1999, No. 11-282752 (Japan).
29. **Орехова, А. И.** Возможность рециклинга неодимсодержащих шлифотходов в чугунолитейном производстве [Текст] / А. И. Орехова, Е. В. Кудрявцева, С. В. Лактионов / *Новые тенденции рационального использования вторичных ресурсов и проблемы экологии: материалы VI ежегод.конф.* – М. : МИСиС, 2008. – С. 130-135.
30. **Zhang, Xuan-xu.** New process for production of REM on chart «electricreduction – liquid extraction» by reagent P507 [Text] / Xuan-xu Zhang, Dang-hua Yu, Lian-ping Guo // *Copper. Eng.* – 2010. – No. 1. – Pp. 66-69.
31. **Зоц, Н. В.** Осадительный метод переработки отходов магнитной промышленности [Текст] / Н. В. Зоц, С. В. Шестаков, Д. С. Андреев, В. Э. Лейф / *Научные основы химии и технологии переработки комплексного сырья и синтеза на его основе функциональных материалов : материалы науч. конф. Ч.1.* – Апатиты: КИЦ РАН, 2008. – С. 79-81.

32. **Софронов, В. Л.** Магнитная сепарация шлаков производства сплавов РЗМ – Fe (Co) – В и лигатур РЗМ – Fe [Текст] / В. Л. Софронов, А. С. Буйновский, Ю. Н. Макасеєв и др. // Известия Томского политехн. университета. – 2012. – № 3. – С. 41-44.
33. **Na, H. W.** Effect of scrap size on extraction of neodymium from Nd-Fe-B magnet scrap by liquid metal extraction [Text] / H. W. Na, Y. H. Kim, H. T. Son, I. H. Jung etc. // Curr. Nanosci. – 2014. – Vol. 10, No. 1. – Pp. 128-130.
34. **Bandara, H. M. D.** Value analysis of neodymium content in shredder feed: toward enabling the feasibility of rare earth magnet recycling [Text] / H. M. D. Bandara, J.W. Darcy, D. Apelian, M.H. Emmert // Environ. Sci. and Technol. – 2014. – Vol. 48, No. 12. – Pp. 6553-6560.

КОЛОБОВ ГЕРМАН ОЛЕКСАНДРОВИЧ, кандидат технічних наук, професор-консультант кафедри металургії, Запорізька державна інженерна академія (Запоріжжя, Україна). E-mail: kolobovgerman@rambler.ru

ЛИСИЦА ВАДИМ КОСТЯНТИНОВИЧ, доктор технічних наук, професор кафедри теплоенергетики, Запорізька державна інженерна академія (Запоріжжя, Україна). E-mail: admin@zgia.zp.ua

МОСЕЙКО ЮРІЙ ВІКТОРОВИЧ, кандидат педагогічних наук, доцент кафедри металургії, Запорізька державна інженерна академія (Запоріжжя, Україна). E-mail: yurijmosejko@yandex.ru

ПАВЛОВ ВАСИЛЬ ВОЛОДИМИРОВИЧ, кандидат технічних наук, головний інженер, Запорізький металургійний дослідний завод ПАТ «Інститут Титану». E-mail: povlov_zp@mail.ru

ПЕЧЕРИЦА ОЛЕКСАНДР КОСТЯНТИНОВИЧ, магістрант кафедри металургії, Запорізька державна інженерна академія (Запоріжжя, Україна). E-mail: 15pak93@mail.ru

ВИДОБУВАННЯ РІДКІЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ ІЗ ВІДХОДІВ МАГНІТНИХ СПЛАВІВ І ВИРОБІВ З НИХ

Виконано огляд різних технологій видобування неодиму та інших рідкоземельних елементів з брухту та відходів сплаву на основі системи Nd-Fe-B і постійних магнітів, виготовлених з цього сплаву.

Ключові слова: сплав NdFeB, постійні магніти, скрап, шліфвідходи, шлак, шлам, відділення заліза, витягнення РЗМ

KOLOBOV GERMAN, Candidate of Technical Sciences, Professor-Consultant of Department of Metallurgy, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: kolobovgerman@rambler.ru

LISITSA VADIM, Doctor of Technical Sciences, Professor of Department Heat and Power Engineering, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: admin@zgia.zp.ua

MOSEJKO YURIY, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of Department of Metallurgy, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: yurijmosejko@yandex.ru

PAVLOV VASIL, Candidate of Technical Sciences, Chief Engineer, Zaporizhskij metallurgical pilot plant PAJ «Institute of Tutanium». E-mail: povlov_zp@mail.ru

PECHERITSA ALEXANDER., Undergraduate of Department of Metallurgy, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: 15pak93@mail.ru

PRODUCTION OF RARE EARTH METALS FROM WASTE PRODUCTS MAGNETIC ALLOYS AND PRODUCTS FROM THEM

A review of various technologies for the recovery of neodymium and other rare earth elements from scrap and alloy wastes based on the Nd-Fe-B system and permanent magnets made of this alloy was carried out.

Keywords: NdFeB alloy, permanent magnets, scrap, grinding, slag, sludge, separation of iron, extraction of REM

Стаття надійшла до редакції 03.04.2017 р.
Рецензент, проф. В.С. Ігнат'єв

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>