Д. т. н. **А. М. Амдур**, д. х. н. **Р. А. Апакашев**, д. т. н. **С. Я. Давыдов** (✉), д. т. н. **Н. Г. Валиев**

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, Россия

УДК 553.08:669.213

ИЗВЛЕЧЕНИЕ СОПУТСТВУЮЩЕГО ДРАГОЦЕННОГО МЕТАЛЛА ИЗ ТРУДНООБОГАТИМОГО РУДНОГО СЫРЬЯ СТРОЙИНДУСТРИИ

Исследованы эффективные технологические процессы извлечения сопутствующих ценных компонентов из рудного сырья комбинированием физико-химических способов обогащения с химико-металлургическими методами. Экспериментально установлено, что при нагреве внешним источником тепла дисперсные капли расплавленного драгоценного металла движутся к поверхности руды по порам под действием термокапиллярного давления. После расплавления вмещающей породы капли флотируются пузырьками газа. Разработано пирометаллургическое устройство для извлечения дисперсного драгоценного металла из труднообогатимого минерального сырья в процессе получения литых огнеупорных материалов.

Ключевые слова: *труднообогатимое рудное сырье, сырьевая база, силикатно-карбонатная руда, флотация, извлечение золота, коагуляция.*

Основные тенденции развития современного горно-металлургического комплекса определяются исчерпанием месторождений полезных ископаемых с высоким содержанием легкообогатимых руд. Поэтому в переработке полезных ископаемых возрастает доля упорных руд и техногенного сырья, характеризующихся низким содержанием ценных компонентов и тонкой вкрапленностью минеральных комплексов. Основные направления научных исследований в этой области — обоснование и разработка эффективных технологических процессов извлечения ценных компонентов из отходов добычи и переработки полезных ископаемых, а также комбинирование физико-химических способов обогащения (гравитация, флотация и т. д.) с химико-металлургическими методами (пиро- и гидрометаллургия, автоклавное выщелачивание и т. д.) [1]. Минеральное рудное сырье месторождений, используемое в производстве стройматериалов и рядовых огнеупоров, а также в керамической и стекольной отрасли, не является исключением. К нему относят кварц-каолиновое сырье, песчано-глинистые массы, а также силикатно-карбонатную руду.

Основой химического состава глинообразующих минералов являются Al_2O_3 и SiO_2. Оксиды кремния и алюминия традиционно составляют сырьевую базу производства многих строительных и огнеупорных материалов. Глина содержит один или несколько минералов группы каолинита, монтмориллонита или других слоистых алюмосиликатов, может содержать песчаные и карбонатные частицы. Как правило, породообразующим минералом в глине является каолинит, его состав, мас. %: SiO_2 47, Al_2O_3 39, вода 14. При этом важно, что наличие SiO_2 в глинистых рудах, а также в рудах иного типа является косвенным признаком сопутствующего содержания золота. Установлено, что в глинистых рудах, в песчано-гравийных месторождениях, в силикатно-карбонатных рудах находятся примеси золота в ассоциированном тонкодисперсном и вкрапленном состоянии.

Отметим, что в последнее время уделяется большое внимание совершенствованию технологии производства керамических стеновых изделий, внедрению в технологический процесс нетрадиционного и техногенного сырья. Одним из экономически выгодных направлений использования глинистого и силикатно-карбонатного минерального сырья является получение на его основе стеновых керамических изделий с высокими эксплуатационными свойствами [2].

Силикатно-карбонатная руда — это монолитная, прочная, мелко-, среднезернистая, преимущественно массивного сложения руда серого, темно-серого и кремово-серого цвета. Руда имеет текстурный рисунок с разноориентированными тонкими трещинами, заполненными оксидами и гидроксидами марганца и

✉
С. Я. Давыдов
E-mail: davidovtrans@mail.ru

железа. Окисленные поверхности руды нередко пористы и имеют сравнительно небольшую плотность. Для силикатно-карбонатных руд с вторичной прожилковой текстурой характерно наличие прожилков разной мощности (0,05–1,5 мм), выполненных карбонатами или оксидами и гидроксидами марганца и железа. Прожилки, выполненные карбонатами, мощностью до 1,5 мм рассекают руду в виде полос, а прожилки мощностью 0,02–0,05 мм образуют ветвистый рисунок [3].

В настоящей работе опыты проводили с силикатно-карбонатной среднезернистой рудой серого цвета. Данная руда характеризуется весьма сложным составом. По результатам проведенного химического и фазового анализа основными породообразующими минералами данной руды являются, мас. %: кальцит 45,8, кварц 18,5, доломит 12,5, плагиоклаз 9,2, мусковит 5,9, пирит 3,6. В качестве второстепенных и редких минералов в руде обнаружены оксиды и гидроксиды железа, такие как гетит, гидрогетит и гематит, суммарное содержание которых составляет 4,5 %. Компонентом руды является золото, его содержание $3{,}6 \cdot 10^{-4}$ мас. %. Пирит распределен в силикатных и карбонатных породах с ассоциированным с ним тонкодисперсным золотом. По результатам фазового анализа основная часть золота представлена в сростках с сульфидами [4].

В изученной руде золото находится в тонкодисперсном виде (крупность менее 10 мкм). Оно ассоциировано с пиритом и арсенопиритом, а также заключено в кварце и минералах железа и не извлекается цианированием. Эта руда относится к упорным типам руд.

При температурах, превышающих температуру плавления золота и минерального сырья (1300 °С) и выдержке в течение 10 мин распределение частиц золота резко меняется по объему расплава. На поверхности образующегося оксидного расплава (шлака) обнаружены шарообразные выделения металла размером от 1 до 500 мкм и более, которых не было в пробе исходной руды (рис. 1).

В объеме расплава концентрация золота была минимальной. Так как золото практически не вступает в реакции с другими веществами, его химическое взаимодействие с оксидным расплавом будет небольшим, адгезия мала и угол смачивания θ значительно больше 90 град. Поэтому с точки зрения уменьшения свободной энергии системы капельке золота выгодно меньше контактировать с оксидным расплавом и больше с газом, что и реализуется при выделении капель золота на поверхности расплава. Механизмом этого процесса является флотация капелек золота пузырьками газов (рис. 2). При рассмотрении условия флотации, обеспечивающего превышение сил межфазного натяжения над силой тяжести, анализируется одна компонента поверхностного натяжения σ на границе жидкость – газ, что справедливо для границы твердое тело – жидкость – газ. При флотации капель золота в системе присутствуют две жидкости и газ. Тогда для равновесия на периметре смачивания необходимо, чтобы геометрическая сумма всех трех векторов межфазного натяжения ($\sigma_{зш}$ — на границе золото – шлак, $\sigma_з$ — на границе золото – газ, $\sigma_ш$ — на границе шлак – газ) была равна нулю.

Радиусы кривизны верхней (на границе с газом) и нижней (на границе с расплавом плавающей капли) поверхностей из-за разности капиллярных давлений будут неодинаковыми. Давление на нижней поверхности повышено по сравнению с давлением газа на величину гидростатического давления столбика оксидного расплава, в результате чего форма капли искажается. Чтобы записать условие флотации, необходимо проанализировать абсолютные значения всех межфазных натяжений, перечисленных выше. В соответствии с известными данными $\sigma_{зш}$ = 1450 мДж/м^2 и $\sigma_з$ = 1100 мДж/м^2 значи-

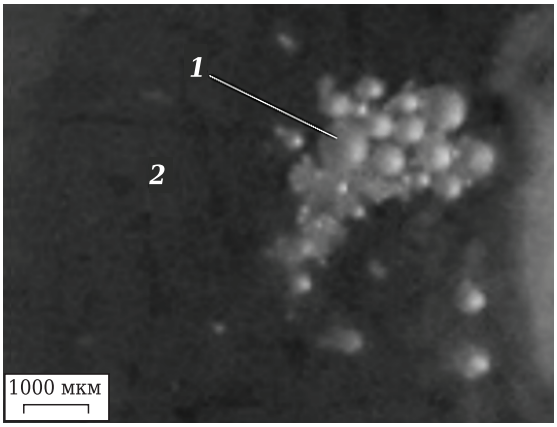

Рис. 1. Фотография укрупненных частиц золота, выделенных из труднообогатимого минерального материала: *1* — капли золота; *2* — силикатный расплав

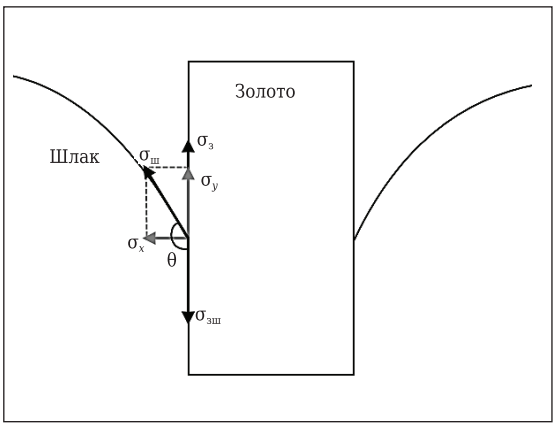

Рис. 2. Схема явления флотации капель золота при продувке оксидного расплава газом: σ_x, σ_y — проекции межфазного натяжения $\sigma_ш$; θ — угол смачивания на границе золото – шлак

тельны, а $\sigma_ш$ = 500 мДж/м^2 имеет меньшую величину. Треугольник межфазных натяжений в нашем случае получается остроугольным, а угол смачивания θ близок к 140 град. Это означает, что излом поверхности капельки золота на трехфазной границе будет не столь большим, поверхность золото – газ не очень отличается от продолжения поверхности золото – оксидный расплав. Схема межфазных натяжений будет подобна случаю с твердым золотом (см. рис. 2). Флотация имеет место, если межфазное натяжение на границе шлак – газ $\sigma_ш$, действующее по периметру смачивания, больше силы тяжести с учетом силы Архимеда. Тогда условие флотации для шарообразных капель радиуса R запишется в виде:

$$2\pi R\sigma_ш\cos\theta > 4/3\pi R^3 g(\rho_{Au} - \rho_ш), \quad (1)$$

где ρ_{Au}, $\rho_ш$ — плотности золота и оксидного расплава (шлака) соответственно.

Уравнение (1) выполняется для капель золота радиусом R = 1–100 мкм.

Капли золота будут флотироваться пузырьками газа, если

$$V_g\rho_p > V_{Au}\rho_{Au}, \quad (2)$$

где V_g, V_{Au} — объем пузырька и капли золота соответственно; ρ_p — плотность газа в пузырьке.

Плотность золота примерно в 8 раз больше плотности оксидного расплава, следовательно, радиус флотирующих капелек золота пузырями должен по крайней мере в 2 раза превышать их радиус. Изучение микрофотографий (см. рис. 1) оксидного расплава после нагрева до 1300 °С показало присутствие пузырьков радиусом 750 мкм, что достаточно для флотации крупных капель золота в соответствии с условием (1).

В процессе флотации идет коагуляция капелек золота, так как их размеры на поверхности шлака после охлаждения значительно превышают исходные, достигая в ряде случаев R = 500 мкм и более.

В пробе исходной руды, не подвергавшейся продувке газом, золото на поверхности расплава не обнаружено. Это указывает на определяющую роль флотации для выделения золота на поверхности расплава.

Таким образом, в процессе нагрева внешним источником тепла дисперсные капли золота движутся к поверхности руды по порам под действием термокапиллярного давления. После расплавления минерального сырья они флотируются пузырьками газов. В процессе флотации идет коагуляция. В результате происходит концентрирование золота на поверхности образующегося оксидного расплава (шлака) и укрупнение частиц до размеров, позволяющих извлекать частицы золота гравитационными и другими методами.

Апробация устройства для извлечения золота из труднообогатимого материала (рис. 3) осуществлена в лабораторных условиях. Руду измельчали до крупности 25–50 мм, наполняли ею термостойкую емкость из корунда *2* вместимостью 2,5 л [5], помещенную в источник нагрева *1* (камерную печь). После нагрева печи до 1300 °С и плавления минерального сырья уровень расплава в горловине *3* термостойкой емкости доводили до уровня, превышающего подвижный дозатор *4*. Для этого через технологическое отверстие в верхней части печи в термостойкую емкость вносили необходимые добавки руды. Затем через патрубок *9* и газопроницаемую огнеупорную капиллярную вставку *10* в образовавшийся расплав подавали газ под давлением.

Режим продувки контролировали визуально через технологическое отверстие в верхней части печи. Продувку расплава осуществляли в течение 20 мин. После завершения продувки подвижным дозатором *4* перекрывали горловину *3* термостойкой емкости *2* и одновременно прекращали подачу газа. Отсеченная порция расплава объемом 200 см^3 была обогащена в процессе флотации укрупненными каплями золота. Затем расплав после открытия шиберного затвора *5* сливали через сливной желоб *7*

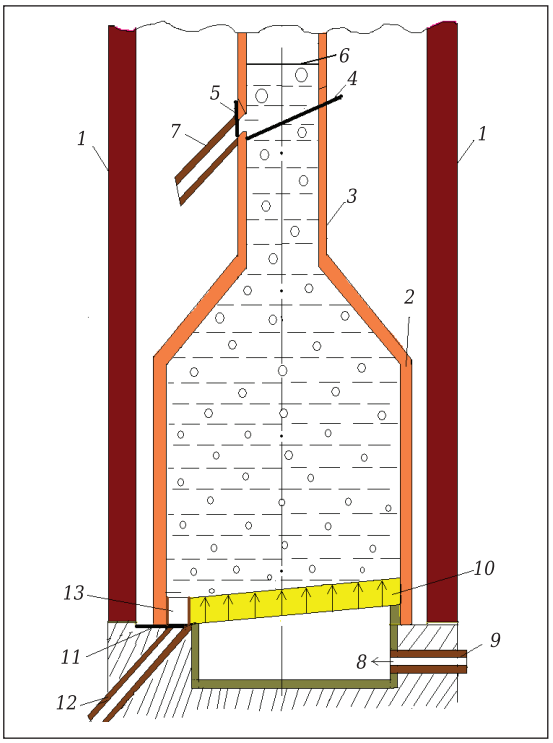

Рис. 3. Схема устройства для извлечения золота из труднообогатимого материала: *1* — источник нагрева материала до расплавленного состояния; *2* — термостойкая емкость; *3* — горловина; *4* — дозатор; *5* — отсекатель в виде шиберного затвора; *6* — поверхность расплава; *7* — желоб; *8* — емкость отделителя; *9* — патрубок для подачи газа; *10* — газопроницаемая огнеупорная вставка; *11* — шиберный затвор; *12* — сливной трубопровод; *13* — карман

в отдельную емкость для охлаждения и последующего отделения частиц золота от пустой породы. Оставшийся в термостойкой емкости расплав, открыв шиберный затвор *11*, выпускали через сливной трубопровод *12* в огнеупорный тигель. Первую порцию этого расплава, концентрирующуюся в кармане *13* и содержащую капли золота, соединяли с порцией расплава объемом 200 см^3 из дозатора для извлечения золота. Последующие порции расплава использовали для получения литых огнеупорных блоков. Геометрическую форму блоков задавали используемой для кристаллизации расплава литейной формой.

После слива и кристаллизации первой порции расплава наличие частиц золота в полученном материале фиксировали с помощью оптического микроскопа Axio Image. Установлено, что на поверхности закристаллизовавшегося расплава наблюдаются шарообразные выделения золота размером 500 мкм и более, которых не было в пробах исходной руды.

Установлена промышленная применимость предложенного устройства для обогащения золотосодержащего материала с использованием термокапиллярного эффекта и флотации для последующего извлечения золота из труднообогатимого золотосодержащего минерального сырья и техногенных образований. Предлагаемое устройство обеспечивает увеличение размера частиц дисперсного золота за счет коагуляции капель золота в процессе флотации при продувке пузырьков газа через расплав золотосодержащего материала.

Библиографический список

1. ***Чантурия, В. А.*** Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья : материалы Междунар. науч. конф. «Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья» (12–15 сентября 2017 г., г. Красноярск) / *В. А. Чантурия, А. П. Козлов.* — Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. — С. 3–6.

2. ***Солодкий, Н. Ф.*** Сырьевые материалы и пути повышения эффективности производства строительной керамики / *Н. Ф. Солодкий, А. С. Шамриков* // Стекло и керамика. — 2009. — № 1. — С. 26–29.

3. ***Соколова, В. Н.*** Минералого-технологическое обоснование способов комплексной химико-металлургической переработки труднообогатимого марганцевого сырья / *В. Н. Соколова, Т. А. Мартынова, Ю. Н. Лосев* // Новые методы технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов. — Петрозаводск, 2009. — С. 32–40.

4. ***Матушкина, А. Н.*** Способ извлечения золота из труднообогатимых руд с помощью температурной обработки / *А. Н. Матушкина, А. М. Амдур* // Известия вузов. Горный журнал. — 2014. — № 5. — С. 129–132.

5. **Пат. 161572 Российская Федерация.** Устройство для обогащения золотосодержащего материала / Амдур А. М., Апакашев Р. А., Давыдов С. Я., Матушкина А. Н. — № 2015131439 ; заявл. 28.07.15 ; опубл. 27.04.16, Бюл. № 12. ■

Получено 22.12.17
© А. М. Амдур, Р. А. Апакашев, С. Я. Давыдов, Н. Г. Валиев, 2018 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ