

Код МРНТИ 53.37.31

*Ж.К. Саулебек¹, А.М. Абдирашит², Р.Т. Толеукадыр¹, Н.Ю. Лу¹¹Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева (г. Караганда, Казахстан),
²Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова (г. Актюбе, Казахстан)

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ МОЛИБДЕН-И ВОЛЬФРАМСОДЕРЖАЩИХ ТУГОПЛАВКИХ ЛИГАТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЕРРОАЛЮМОСИЛИКОКАЛЬЦИЯ

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментов по разработке технологии получения молибден- и вольфрамсодержащих лигатур методом восстановления оксидов тугоплавких металлов в условиях индукционной плавки. В качестве сырья использованы молибденовый концентрат и оксид вольфрама, восстановителем выступал высокоактивный ферроалюмосиликокальций (ФАСК). Температурный контроль осуществлялся с использованием вольфрам-ренийевой термопары, зафиксированы экзотермические пики, отражающие стадии восстановления. Получены опытные образцы лигатур и шлака, проведен химический анализ. В лигатурах зафиксировано содержание до 56% *Mo* и *W*. Результаты подтверждают высокую эффективность восстановительного процесса и технологическую перспективность подхода. Отмечена возможность оптимизации параметров плавки и состава шихты с целью увеличения выхода целевого продукта и снижения энергозатрат.

Ключевые слова: молибден, вольфрам, ферроалюмосиликокальций, индукционная плавка, экзотермия, тугоплавкий металл, кремнеалюминиевые восстановители.

Ферроалюмосиликокальцийді қолдана отырып, құрамында молибден және вольфрамы бар отқа төзімді лигатураларды алу үрдістерін зерттеу

Аннотация. Мақалада индукциялық балқыту жағдайында отқа төзімді металл оксидтерін тотықсыздандыру әдісімен молибден және вольфрамы бар лигатураларды алу технологиясын әзірлеу бойынша эксперименттердің нәтижелері келтірілген. Шикізат ретінде Молибден концентраты мен вольфрам оксиді пайдаланылды, тотықсыздандырығыш жоғары белсенді ферроалюмосиликокальций (ФАСК) болды. Температураны бақылау вольфрам-рений термопарасын қолдану арқылы жүзеге асырылды, қалпына келтіру кезеңдерін көрсететін экзотермиялық шыңдар тіркелді. Лигатуралар мен кождардың тәжірибелік үлгілері алынды, химиялық талдау жүргізілді. Нәтижелер қалпына келтіру процесінің жоғары тиімділігін және тәсілдің технологиялық перспективасын растайды. Мақсатты өнімнің шығымдылығын арттыру және энергия шығынын азайту мақсатында балқыту параметрлері мен шихта құрамын оңтайландыру мүмкіндігі атап өтілді.

Түйінді сөздер: молибден, вольфрам, ферроалюмосиликокальций, индукциялық балқыту, экзотермия, отқа төзімді металл, кремнийалюминий тотықсыздандырығыш.

Research of processes for producing molybdenum- and tungsten-containing refractory alloys using ferroalumosilicocalcia

Abstract. The article presents the results of experiments on the development of a technology for producing molybdenum- and tungsten-containing ligatures by reducing refractory metal oxides under induction melting conditions. Molybdenum concentrate and tungsten oxide were used as raw materials, and highly active ferroalumosilicocalcium (FASC) was used as a reducing agent. Temperature control was carried out using a tungsten-rhenium thermocouple, exothermic peaks reflecting the stages of reduction were recorded. Pilot samples of ligatures and slag were obtained, and chemical analysis was carried out. The content of up to 56% Mo and W was recorded in the ligatures. The results confirm the high efficiency of the reduction process and the technological prospects of the approach. The possibility of optimizing the melting parameters and the composition of the charge in order to increase the yield of the target product and reduce energy costs is noted.

Key words: molybdenum, tungsten, ferroalumosilicocalcium, induction melting, exothermy, refractory metal, silicon-aluminum reducing agents.

Введение

На основе физико-химических исследований шихтовых материалов и термодинамического моделирования процесса выплавки вольфрам- и молибденсодержащих лигатур установлена принципиальная возможность получения целевого сплава. В связи с этим, с целью установления оптимального технологического режима и технических параметров выплавки, а также получения опытных образцов, приближенных к реальным условиям протекания восстановительных реакций, была проведена серия лабораторных испытаний с использованием кремнеалюминиевого восстановителя – ферроалюмосиликокальция (ФАСК). Опытные плавки проводились в индукционной печи, оснащенной трансформатором мощностью 16 кВА. Кремнеалюминиевые восстановители, получаемые из высокозольных углей Казахстана, представляют собой ферросплавы нового поколения, разрабатываемые Химико-металлургическим институтом им. Ж. Абишева.

Согласно данным [1–3], источникам вольфрама и молибдена в мировом производстве служат природные руды, преимущественно шеелит ($CaWO_4$) с содержанием WO_3 до 65% и вольфрамит ($(Fe, Mn)WO_4$) с содержанием WO_3 до 76% для вольфрама, а также молибденит (MoS_2)

с содержанием *Mo* до 60% для молибдена. В условиях Казахстана вольфрам встречается в скарновых и жильных месторождениях, среди которых наиболее известны Коктенколь, Бакенское, Сарыжон и Актасское, расположенные в Жамбылской, Восточно-Казахстанской и Алматинской областях [4–6].

Казахстан входит в число ведущих стран по запасам вольфрама (более 2 млн тонн WO_3), однако большая часть месторождений в настоящее время не разрабатывается. Молибден представлен в основном как попутный компонент в медно-порфировых месторождениях (Акшо, Жезды, Коксу, Бозшаколь), где извлекается преимущественно методом флотации с последующим обжигом концентратов [6–8].

Методы исследования

В ходе данной научно-исследовательской работы в качестве источников вольфрама и молибдена были использованы чистый оксид вольфрама и молибденовый концентрат. Целью проведенных исследований являлось установление оптимального технологического режима и технических параметров выплавки с получением опытных образцов вольфрам- и молибденсодержащих лигатур.

Для проведения работ по выплавке вольфрам- и молибденсодержащих лигатур в качестве плавильного агрегата использовалась лабораторная индукционная печь с трансформатором мощностью 16 кВА. Индукционная печь представляет собой исследовательскую установку, предназначенную для получения высоких температур и моделирования металлургических процессов. Установка оснащена индукционным нагревателем; в качестве рабочего пространства используется графитовый тигель, размещенный внутри индукторной катушки, а также силовой высокочастотный генератор. Температурное регулирование осуществляется плавно с помощью тиристорного преобразователя, управляющего подачей мощности на индуктор. Это позволяет генерировать в тигле интенсивные вихревые токи, обеспечивающие равномерный нагрев материала при частоте от 1 до 100 кГц. Контроль температуры осуществлялся с использованием вольфрам-рениевой термопары типа ВР-5/20. Горячий спай термопары, помещенный в армированный корундовый чехол, устанавливался в непосредственной близости к исследуемому материалу. Нагрев производился линейно со скоростью 10 °С в минуту. Температура выдержки превышала расчетную (теоретическую) на 50–60 °С, что обусловлено особенностями теплообмена при электромагнитной индукции (рис. 1).



Рис. 1. Индукционная печь.
Сурет 1. Индукциялық пеш.
Figure 1. Induction furnace.

Шихтовые материалы использовались с фракционным составом менее 0,5 мм. Перемешанную шихтовую смесь загружали в алундовый тигель, который затем помещался в рабочую зону индукционной печи.

Результаты исследования

Первую опытную плавку начали с использованием молибденового концентрата. Состав шихтовой смеси %: концентрат молибдена – 37,5; ФАСК – 25,00; известь – 37,5.

Резкий первый экзотермический пик при температуре 1000 °С согласно термодинамическому анализу, проведенному ранее, является следствием восстановления молибдена алюминием и кальцием. Второй экзотермический пик является следствием восстановления молибдена предположительно силицидами железа и свободным кремнием, содержащимися в сплавах ФАСК. Результаты температурного режима процесса выплавки молибденсодержащей лигатуры приведены на рис. 2.

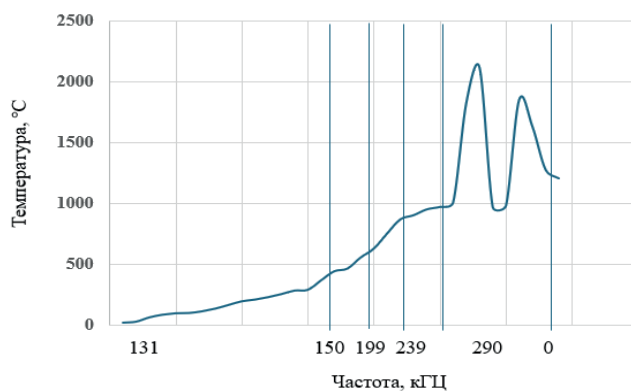


Рис. 2. Динамика изменения температуры в смеси при выплавке молибденсодержащей лигатуры.

Сурет 2. Құрамында молибден бар лигатураны балқыту кезіндегі қоспадағы температураның өзгеру динамикасы.

Figure 2. Dynamics of temperature change in the mixture during smelting of molybdenum-containing ligature.

Опытные образцы молибденсодержащей лигатуры и шлака, полученные с использованием ФАСК, показаны на рис. 3.

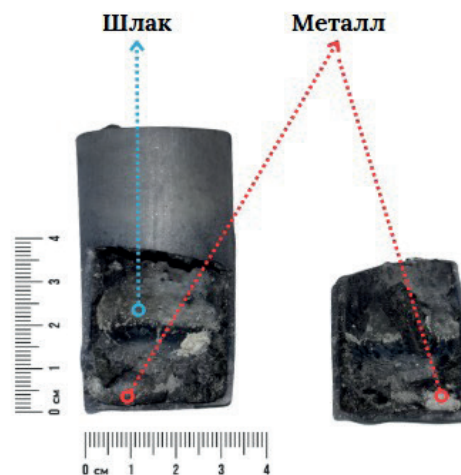


Рис. 3. Типичный вид образцов выплавки молибденсодержащей лигатуры и шлака.
Сурет 3. Құрамында молибден бар лигатура мен кожды балқыту үлгілерінің типтік түрі.
Figure 3. Typical view of samples of smelting of molybdenum-containing ligature and slag.

Вторую опытную плавку начали с использованием оксида вольфрама. Состав шихтовой смеси %: оксид вольфрама – 37,5; ФАСК – 15–25; известь – 37,5.

Результаты температурного режима процесса выплавки вольфрамсодержащей лигатуры приведены на рис. 4. На графике прослеживается последовательное повышение температуры с увеличением частоты индукционного нагрева, что отражает характерный процесс энергозвода в систему. При достижении диапазона частот около 290–300

кГц наблюдается резкий экзотермический пик температуры в интервале 1010 °С. Согласно термодинамическому анализу, проведенному ранее, данный температурный всплеск обусловлен активным восстановлением оксида вольфрама металлическим алюминием и кальцием, входящими в состав комплексного восстановителя – ферроалюмосиликокальция (ФАСК). В последующем температурном диапазоне, при дальнейших скачках температуры до более 2000 °С, можно предположить развитие реакции восстановления вольфрама также силицидами железа и свободным кремнием, содержащимися в структуре восстановителя. Эти процессы сопровождаются интенсивным тепловыделением, что отражается на повторяющихся пиках температуры.

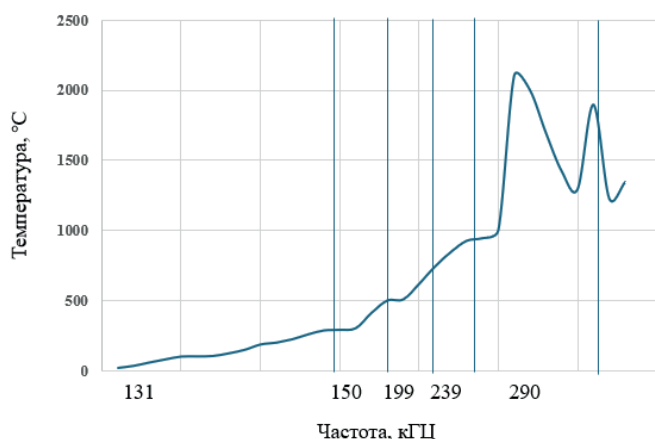


Рис. 4. Динамика изменения температуры в смеси при выплавке молибденсодержащей лигатуры.

Сурет 4. Құрамында молибден бар лигатураны балқыту кезіндегі қоспадағы температураның өзгеру динамикасы.

Figure 4. Dynamics of temperature change in the mixture during smelting of molybdenum-containing ligature.

Опытные образцы вольфрамсодержащей лигатуры и шлака, полученные с использованием ФАСК, показаны на рис. 5.

Методом «кислотного анализа» были определены состав образцов опытных плавок (таблицы 1 и 2).

Таблица 1

Химический состав опытных образцов лигатуры

Кесте 1

Лигатура үлгілерінің химиялық құрамы

Table 1

Chemical composition of experimental samples of ligature

№ металла	Mo	Si	Al	Fe	W
1	45,66	5,13	4,24	36,96	-
2	50,24	11,42	5,04	31,75	-
3	-	5,88	1,26	38,69	54,15
4	-	4,39	2,06	37,55	56,00

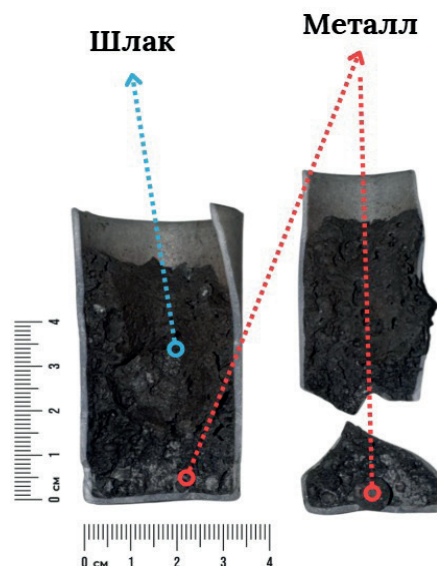


Рис. 5. Типичный вид образцов выплавки вольфрамсодержащей лигатуры и шлака.

Сурет 5. Құрамында вольфрамы бар лигатура мен қожды

балқыту үлгілерінің типтік түрі.

Figure 5. Typical view of samples of smelting of tungsten-containing ligature and slag.

Таблица 2

Химический состав шлака

Кесте 2

Қождың химиялық құрамы

Table 2

Chemical composition of slag

№ шлака	MoO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	W _{общ.}
1	1,23	23,60	14,50	41,50	-
2	0,48	19,60	12,18	45,85	-
3	-	23,45	28,06	44,45	1,5
4	-	24,65	25,14	46,20	0,6

Обсуждение результатов

Полученные результаты опытных плавок демонстрируют эффективность применения комплексного восстановителя ФАСК (ферроалюмосиликокальция) при восстановлении тугоплавких металлов из их оксидов в условиях индукционного нагрева. Использование лабораторной индукционной печи позволило достичь необходимых температурных условий и обеспечить равномерный нагрев шихтовых материалов, что важно для контролируемого протекания восстановительных реакций.

В случае выплавки молибденсодержащей лигатуры на основе молибденового концентрата (с содержанием молибдена около 37,5%) были зафиксированы два выраженных экзотермических пика: первый при ~1000 °С, что соответствует активному восстановлению Mo оксидов алюминием и кальцием, и второй – на более высоких

температурах, обусловленный возможным участием в восстановлении силицидов железа и свободного кремния из состава ФАСК. Морфология и плотность образцов свидетельствуют о сформировавшейся металлической фазе с хорошей текучестью и разделением со шлаком. Результаты химического анализа лигатур (таблица 1) подтверждают высокое содержание *Mo* (до 50,24%) и наличие легирующих элементов *Fe*, *Si* и *Al*, характерных для применения ФАСК. Содержание *Si* и *Al* в пределах 4–11% может быть оптимизировано в зависимости от требований к конечному продукту [9–10].

При выплавке вольфрамсодержащей лигатуры из чистого оксида вольфрама аналогично наблюдаются температурные скачки, характерные для экзотермических восстановительных реакций. Первый интенсивный пик зафиксирован при температуре около 1010 °С и, по аналогии с системой *Mo–Al/Са*, соответствует восстановлению *WO₃* с участием алюминия и кальция. Повторные пики при температурах выше 2000 °С указывают на продолжение восстановления, в том числе при участии силицидных фаз и свободного кремния. Химический состав готовых вольфрамсодержащих лигатур демонстрирует содержание *W* до 56% при умеренном уровне примесей *Fe*, *Si* и *Al*. Сравнительно высокая концентрация железа объясняется ферросплавной природой восстановителя ФАСК [11–12].

Шлаковые фазы после плавки обеих систем показывают эффективное связывание оксидов алюминия, кальция и кремния. Остаточное содержание *MoO₃* в шлаках составляет менее 1,3 %, а *WO₃* – не более 1,5%, что свидетельствует о высокой степени восстановления целевых компонентов. Низкое содержание остаточного металла в шлаке подтверждает эффективность выбранного температурного режима и достаточную активность восстановительных процессов.

Заключение

В ходе проведенного исследования была реализована экспериментальная методика выплавки молибден- и воль-

фрамсодержащих лигатур с применением лабораторной индукционной установки, обеспечивающей точное управление температурным режимом. В качестве исходных компонентов использовались молибденовый концентрат и оксид вольфрама, а восстановителем служил ферроалюмосиликокальций (ФАСК), что позволило обеспечить восстановление тугоплавких оксидов при сравнительно невысоких температурах.

Анализ температурных кривых выявил наличие характерных экзотермических эффектов, ассоциированных с последовательными стадиями восстановления оксидов металлическими компонентами ФАСК. Полученные продукты выплавки продемонстрировали четкое разделение металлической и шлаковой фаз, что подтверждено визуальными наблюдениями и химическим анализом. Концентрации целевых элементов в лигатурах достигали высоких значений, свидетельствуя об эффективности выбранного восстановительного механизма и подобранного состава шихты.

Комплексная оценка состава шлаков и металлических образцов позволила установить наличие остаточных соединений, подтверждающих неполную инертность отдельных компонентов, а также проследить особенности перераспределения элементов в системе при высокотемпературной обработке. В совокупности, полученные результаты указывают на технологическую целесообразность применения предложенного подхода для получения металлических лигатур тугоплавких металлов и могут служить основой для последующей оптимизации параметров процесса в условиях опытно-промышленного уровня.

Благодарность

Данные исследования были проведены в рамках программно-целевого финансирования Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR23991563).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Суруп Г.Р., Трубецкая А., Тангстад М. (9 ноября 2020 г.). Древесный уголь как альтернативный восстановитель в производстве ферросплавов: обзор. <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/11/1432> (на английском языке)
2. Йи Г., Элой М., Джефф В. Д. (2 августа 2021 г.). Недавний прогресс в исследовании флотации молибденита: обзор. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S000186862100107X?via%3DiHub> (на английском языке)
3. Линсмайер К., Рит М., Актаа Ж. (9 июня 2017 г.). Разработка перспективных материалов с высоким тепловым потоком и плазменным покрытием. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1741-4326/aabf71> (на английском языке)
4. Современное состояние мирового и отечественного производства ферросплавов / Рожихина И.Д. [и др.] // Известия горно-металлургического отделения РАЕН. Отделение металлургии. 2020. № 43. С. 47–62 (на английском языке)
5. Исследования по обжигу низкокачественного молибденового продукта с карбонатом натрия / Тусупбекова Т. [и др.] // Труды университета. 2025. № 1 (98). С. 25–32 (на русском языке)
6. Фрибе П., Томас С., Пауел М.Н. (8 июня 2025 г.). Устойчивое извлечение редкоземельных элементов из жестких дисков: шлифование магнитов NdFeB и финансовый и экологический анализ. <https://www.mdpi.com/1996-1944/18/12/2697> (на английском языке)
7. Получение комплексных кальцийсодержащих ферросплавов из отвальных металлургических шлаков и высокозольных углей / Махамбетов Е.Н. [и др.] // Сталь. 2019. № 10. С. 18–21 (на русском языке)

8. Получение комплексного алюмосиликохромового сплава бесшлаковым способом / Шабанов Е.Ж. [и др.] // *Металлургия России*. 2014. № 5. С. 11–14 (на английском языке)
9. Бартенев А., Иссагулов А., Байсанов А. Исследование микроструктуры и фазового состава нового комплексного кальцийсодержащего сплава // *Металлургия*. 2016. Т. 55. № 4. С. 727–729 (на английском языке)
10. Разработка технологии сложного сплава алюминий-кремний-хром с использованием некондиционного сырья / Мехтиева А. [и др.] // *Металлургия*. Загреб. 2015. Т. 54. № 1. С. 157–160 (на английском языке)
11. Махамбетов Е.Н., Байсанов А.С., Оспанов Н.И., Омаров М.Ш. Исследование электрофизических свойств шихтовых материалов для выплавки кальцийсодержащих сплавов // *Материалы VIII Межд. науч.- практ. конф. «Научно-технич. прогресс в металлургии»*, Темиртау, 2015. С. 152–156 (на русском языке)
12. Махамбетов Е.Н., Байсанов А.С., Набиев А.М. и др. Переработка и использование твердых техногенных отходов отвалных металлургических шлаков для получения кальцийсодержащих ферросплавов // *Труды конгресса «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» «ТЕХНОГЕН – 2017»*, Екатеринбург, 2017. С. 144–147 (на русском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Суруп Г.Р., Трубецкая А., Тангстад М. (9 қараша 2020 ж.). Ферроқорытпа өндірісіндегі балама тотықсыздандырғыш ретінде көмір қолдану: шолу. <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/11/1432> (ағылшын тілінде)
2. Ыи Г., Элой М., Джефф В.Д. (2 тамыз 2021 ж.). Молибденит флотациясын зерттеудегі соңғы прогресс: шолу. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S000186862100107X?via%3Dihub> (ағылшын тілінде)
3. Линсмайер К., Рит М., Актаа Ж. (9 маусым 2017 ж.). Жоғары жылу ағыны бар перспективалы материалдарды және плазмалық өңдеу материалдарын әзірлеу. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1741-4326/aabf71> (ағылшын тілінде)
4. Әлемдік және отандық ферроқорытпа өндірісінің қазіргі жағдайы / Рожихина И.Д. [және т. б.] // *РАЕН тау-кен металлургия бөлімінің жаңалықтары*. Металлургия бөлімшесі. 2020. № 43. Б. 47–62 (ағылшын тілінде)
5. Натрий карбонаты бар төмен сапалы молибден өнімін күйдіру бойынша зерттеулер / Тусупбекова Т. [және т. б.] // *Университет еңбектері*. 2025. № 1 (98). Б. 25–32 (орыс тілінде)
6. Фрибе П., Томас С., Пауел М.Н. (8 маусым 2025 ж.). Қатты дискілерден сирек элементтерді тұрақты алу: NdFeB магниттерін тегістеу және қаржылық және экологиялық талдау. <https://www.mdpi.com/1996-1944/18/12/2697> (ағылшын тілінде)
7. Үйінді металлургиялық қождардан және күлі жоғары көмірден құрамында кальций бар кешенді ферроқорытпаларды алу / Махамбетов Е.Н. [және т. б.] // *«Болат»*. 2019. № 10. Б. 18–21 (орыс тілінде)
8. Қожсыз тәсілмен кешенді алюмосиликохром қорытпасын алу / Шабанов Е.Ж. [және т. б.] // *Ресей Металлургиясы*. 2014. № 5. Б. 11–14 (ағылшын тілінде)
9. Бартенев А., Иссагулов А., Байсанов А. Құрамында кальций бар жаңа күрделі қорытпаның микроқұрылымы мен фазалық құрамын зерттеу // *Металлургия*. 2016. Т. 55. № 4. Б. 727–729 (ағылшын тілінде)
10. Алюминий-кремний-хром күрделі қорытпасы технологиясын кондициялық емес шикізатты пайдалана отырып әзірлеу / Мехтиева А. [және т. б.] // *Металлургия*. Загреб. 2015. Т. 54. № 1. Б. 157–160 (ағылшын тілінде)
11. Махамбетов Е.Н., Байсанов А.С., Оспанов Н.И., Омаров М.Ш. Құрамында кальций бар қорытпаларды балқытуға арналған шихта материалдарының электрофизикалық қасиеттерін зерттеу // *«Металлургиядағы ғылыми-техникалық прогресс» VIII Халықаралық ғылыми-практикалық конференция материалдары*, Темиртау, 2015. Б. 152–156 (орыс тілінде)
12. Махамбетов Е.Н., Байсанов А.С., Набиев А.М. и др. Құрамында кальций бар ферроқорытпаларды алу үшін үйінді металлургиялық қождардың қатты техногендік қалдықтарын өңдеу және пайдалану // *«Техногендік түзілімдерді қайта өңдеу және кәдеге жарату процестерінің іргелі зерттеулері және қолданбалы әзірлемелері» «ТЕХНОГЕН – 2017» конгресінің еңбектері*, Екатеринбург, 2017. Б. 144–147 (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Surup G.R., Trubetskaya A., Tangstad M. (November 9, 2020). Charcoal as an Alternative Reductant in Ferroalloy Production: A Review. <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/11/1432> (in English)

2. Gaosong Yi, Eloy Macha, Jeff Van Dyke. (August 2, 2021). Recent progress on research of molybdenite flotation: A review. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S000186862100107X?via%3Dihub> (in English)
3. Linsmeier C., M. Rieth, J. Aktaa. (June 9, 2017). Development of advanced high heat flux and plasma-facing materials. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1741-4326/aa6f71> (in English)
4. Modern state of the world and domestic production of ferroalloys [Current state of global and domestic production of ferroalloys], Rozhikhina I.D. [et. al.], Bulletin of the mining and metallurgical section of the Russian Academy of Natural Sciences. Department of metallurgy. 2020. No. 43. 47–62 pp. (in English)
5. Issledovaniya po obzhigu nizkokachestvennogo molibdenovogo produkta s karbonatom natriya [Research on roasting low-grade molybdenum product with sodium carbonate], Tusupbekova T. et al., Trudy universiteta [Proceedings of the University]. 2025. No. 1 (98). 25–32 pp. (in Russian)
6. Friebe P., Tomasz S., Paweł M.N. (June 8, 2025). Sustainable recovery of rare earth elements from hard disks: grinding NdFeB magnets and financial and environmental analysis. <https://www.mdpi.com/1996-1944/18/12/2697> (in English)
7. Poluchenie kompleksnykh kal'cijsoderzhashchih ferrosplavov iz otval'nykh metallurgicheskikh shlakov i vysokozol'nykh uglej [Production of complex calcium-containing ferroalloys from waste metallurgical slags and high-ash coals], Mahambetov E.N. [et al.], Stal [Steel]. 2019. No. 10. 18–21 pp. (in Russian)
8. Fabrication of a complex aluminosilicochrome alloy by a slag-free method / Shabanov Ye. Zh. [et al.] // Russian metallurgy (Metally). 2014. No. 5. 11–14 pp. (in English)
9. Bartenev A., Issagulov A., Baisanov A. Studying microstructure and phase composition of a new complex calcium containing alloy // Metallurgy. 2016. V. 55. No. 4. 727–729 p. (in English)
10. Development of technology of complex aluminum-silicon-chrome alloy with utilization of off grade raw materials / Mekhtiev A. [et al.] // Metallurgy. Zagreb, 2015. V. 54. No. 1. 157–160 pp. (in English)
11. Mahambetov E.N., Bajsanov A.S., Ospanov N.I., Omarov M.Sh. Issledovanie jelectrofizicheskikh svoystv shihtovykh materialov dlja vyplavki kal'cijsoderzhashchih splavov [Study of electrophysical properties of charge materials for smelting calcium-containing alloys], Materialy VIII Mezhd. nauch.-prakt. konf. «Nauchno-tehnich. progress v metallurgii» [Proceedings of the VIII Int. scientific-practical. conf. «Scientific and technical progress in metallurgy»], Temirtau, 2015. 152–156 pp. (in Russian)
12. Mahambetov E.N., Bajsanov A.S., Nabiev A.M. Pererabotka i ispol'zovanie tverdykh tehnogennykh othodov otval'nykh metallurgicheskikh shlakov dlja poluchenija kal'cijsoderzhashchih ferrosplavov [Processing and use of solid technogenic waste of metallurgical slags for the production of calcium-containing ferroalloys], Trudy kongressa «Fundamental'nye issledovaniya i prikladnye razrabotki processov pererabotki i utilizacii tehnogennykh obrazovaniy» «TEHNOGEN – 2017» [Proceedings of the congress «Fundamental research and applied development of processes for processing and utilization of man-made formations» «TEHNOGEN – 2017»], Ekaterinburg, 2017. 144–147 pp. (in Russian)

Сведения об авторах:

Саулебек Ж.К., докторант Ph.D по образовательной программе 8D07203 – «Металлургия», мл. научн. сотрудник, Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева (г. Караганда, Казахстан), zhalgas.saulebek@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3852-7513>

Абдирашит А.М., Ph.D, ст. преподаватель, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова (г. Актөбе, Казахстан), asik_942017@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0718-3041>

Толукадыр Р.Т., докторант Ph.D по образовательной программе 8D07201 – «Металлургия», научн. сотрудник, Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева (г. Караганда, Казахстан), ruslan-94kz@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7191-8893>

Лу Н.Ю., (к.х.н., зам. директора по научной части, Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева (г. Караганда, Казахстан), hmi2009@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3624-0984>

Авторлар туралы мәліметтер:

Саулебек Ж.Қ., 8D07201 – «Металлургия» білім беру бағдарламасы бойынша Ph.D докторанты, кіші ғылыми қызметкер, Ж. Әбішев ат. Химия-металлургия институты (Қарағанды қ., Қазақстан)

Әбдирашит А.М., Ph.D, аға оқытушы, К. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті (Ақтөбе қ., Қазақстан)

Толукадыр Р.Т., 8D07201 – «Металлургия» білім беру бағдарламасы бойынша Ph.D докторанты, ғылыми қызметкер, Ж. Әбішев ат. Химия-металлургия институты (Қарағанды қ., Қазақстан)

Лу Н.Ю., х.ғ.к., директордың ғылыми бөлім бойынша орынбасары, Ж. Әбішев ат. Химия-металлургия институты (Қарағанды қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Saulebek Zh.K., Ph.D student in the educational program 8D07203 – «Metallurgy», junior research fellow, Chemical-Metallurgical Institute named after Zh. Abishev (Karaganda, Kazakhstan)

Abdirashit A.M., Ph.D, Senior Lecturer, K. Zhubanov Aktobe regional university (Aktobe, Kazakhstan)

Toleukadyr R.T., Ph.D student in the educational program 8D07203 – «Metallurgy», junior research fellow, Chemical-Metallurgical Institute named after Zh. Abishev (Karaganda, Kazakhstan)

Lu N.Yu., Ph.D., Deputy Director for Research, Chemical and Metallurgical Institute named after Zh. Abishev (Karaganda, Kazakhstan)