

УДК: 622.2+666.942

doi 10.70769/3030-3214.SRT.3.4.2025.33

ПОЛУЧЕНИЕ ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЛОТООТХОДА МЕДНО-МОЛИБДЕНОВЫХ РУД



**Матмусаев Илхом
Қурбоналиевич**

Главный инженер МОФ-2
Алмалыкского горно-
металлургического комбината,
Алмалык, Узбекистан



**Хасанов Абдирашид
Салиевич**

Заместитель директора по
технологиям Центра разработки
и внедрения инновационных
технологий, АО «Алмалыкский
горно-металлургический
комбинат», доктор технических
наук, профессор,
Алмалык, Узбекистан
E-mail: a.xasanov@srt-journal.uz
ORCID ID: 0009-0004-9162-7622



**Мухамедбаев Абдували
Абдусаттарович**

Директор ООО «ANTENN-
BRANCH», к.т.н.,
Алмалык, Узбекистан



**Шакаров Тулкин
Исмаатович**

Доцент, к.т.н., Алмалыкский
филиал НИТУ МИСЦ,
Алмалык, Узбекистан

Аннотация. В статье исследованы возможности получения портландцементного клинкера с использованием флотационных отходов медно-молибденовых руд МОФ-2 АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат» (АО «АГМК») в качестве глинистого компонента сырьевой смеси. Клинкер был получен обжигом при температуре 1380 °С, после чего изучены его петрографические, минералогические и физико-механические свойства. Результаты экспериментального клинкера сопоставлены с промышленным клинкером, обожжённым при 1450 °С. Установлено, что использование флотационных отходов способствует формированию основных клинкерных минералов и позволяет получить материал, соответствующий классу прочности 42,5. Показано, что применение техногенных отходов обеспечивает снижение температуры обжига, повышение энергоэффективности и уменьшение экологической нагрузки. **Ключевые слова:** цементный клинкер, флотационные отходы медно-молибденовых руд, МОФ-2, АО «АГМК», петрография, клинкерные минералы, физико-механические свойства, энергосбережение.

MIS-MOLIBDEN RUDALARINING FLOTATSIYA CHIQINDISIDAN SEMENT KLINKERINI OLISH

**Matmusayev Ilhom
Qurbonaliyevich**

“Olmaliq kon-metallurgiya
kombinati” AJ MBF-2 bosh
muhandisi, Olmaliq, O‘zbekiston

**Xasanov Abdirashid
Saliyevich**

“Olmaliq kon-metallurgiya
kombinati” AJ Innovatsion
texnologiyalarni rivojlantirish va
joriy etish markazi texnologiya
bo‘yicha direktor o‘rinbosari,
texnika fanlari doktori, professor,
Olmaliq, O‘zbekiston

**Muxamedboyev Abduvali
Abdusattarovich**

“ANTENN-BRANCH” MChJ
direktori, t.f.n.,
Olmaliq, O‘zbekiston

**Shakarov To‘lqin
Ismatovich**

MTU MISIS ning Olmaliq filiali
dotsenti, t.f.n. Olmaliq, O‘zbekiston

Annotatsiya. Ushbu maqolada “Olmaliq kon-metallurgiya kombinati” AJ MBF-2 mis-molibden rudalarini boyitish jarayonida hosil bo‘ladigan flotatsiya chiqindilaridan portlandsement klinkerini olish imkoniyatlari tadqiq etilgan. Tadqiqotlar flotatsiya chiqindisini klinker xomashyo aralashmasida gilli komponent sifatida qo‘llash asosida olib borildi. Klinker 1380 °C haroratda kuydirilib, uning pem-

pografik, mineralogik hamda fizik-mexanik xossalari o'rganildi. Olingan natijalar sanoat sharoitida 1450 °C da olingan ishlab chiqarish klunker bilan taqqoslandi. Pempografik tahlillar klunkerda asosiy minerallar — alit, belit, uchkalsiyli alyuminat va kalsiyli alyumoferitlarning shakllanganini ko'rsatdi. Fizik-mexanik sinovlar tajribaviy klunkerning mustahkamlik ko'rsatkichlari 42,5 sinf talablariga mos kelishini tasdiqladi. Tadqiqot natijalari flotatsiya chiqindilaridan foydalanish klunker kuydirish haroratini pasaytirish, energiya tejamkorligini oshirish hamda texnogen chiqindilarni qayta ishlash orqali ekologik yuklamani kamaytirish imkonini berishini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: sement klunker, mis–molibden rudasi flotatsiya chiqindisi, MBF-2, “Olmaliq kon-metallurgiya kombinati” AJ, portlandsement, pempografiya, klunker minerallari, alit, belit, fizik-mexanik xossalari, kuydirish harorati, texnogen chiqindilar.

PRODUCTION OF CEMENT CLINKER USING COPPER-MOLYBDENUM ORE FLOOT WASTE

**Matmusaev Ilhom
Kurbanalievich**

Chief Engineer of the CC-2 of JSC
“Almalyk Mining and Metallurgical
Combine”, Almalyk, Uzbekistan

**Khasanov Abdirashid
Salievich**

Deputy Director for Technology of
the Center for Development and
Implementation of Innovative
Technologies, JSC “Almalyk
Mining and Metallurgical
Combine”, Doctor of Technical
Sciences, Professor,
Almalyk, Uzbekistan

**Mukhamedbaev Abduvali
Abdusattarovich**

Director of “ANTENN-BRANCH”
LLC, Ph.D., Almalyk, Uzbekistan

**Shakarov Tulkin
Ismatovich**

Associate Professor of the Almalyk
branch of MTU MISIS, Candidate
of Technical Sciences.
Almalyk, Uzbekistan

Abstract. The article investigates the production of Portland cement clinker using flotation waste of copper-molybdenum ores from Copper Processing Factory-2 (CPF-2) of Almalyk Mining and Metallurgical Combine JSC (AMMC JSC) as a clay component of the raw material mixture. The clinker was fired at a temperature of 1380 °C, and its petrographic, mineralogical, and physico-mechanical properties were studied. The experimental clinker was compared with an industrial clinker fired at 1450 °C. The results show that the use of flotation waste promotes the formation of the main clinker minerals and ensures strength characteristics corresponding to class 42.5. The proposed approach allows reducing the firing temperature, improving energy efficiency, and decreasing the environmental impact through the utilization of technogenic waste.

Keywords: cement clinker, copper-molybdenum ore flotation waste, CPF-2, AMMC JSC, petrography, clinker minerals, physico-mechanical properties, energy efficiency.

Введение. Актуальной научно-практической задачей современного материаловедения и минерально-сырьевого комплекса является разработка инновационных технологических решений, направленных на формирование высокотехнологичной производственной базы для глубокой переработки и рационального использования минерального сырья и техногенных отходов. Строительная индустрия, являясь одной из наиболее материалоемких отраслей, особенно нуждается в подобных подходах. В связи с этим особую значимость приобретает создание эффективных методов комплексной переработки и внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий получения порт-

ландцементного клинкера с использованием техногенных отходов обогатительных фабрик.

Флотационное обогащение полезных ископаемых, несомненно, является одним из наиболее эффективных методов переработки минерального сырья [1,2]. Несмотря на внедрение передовых технологий флотационного обогащения, 90-95% исходной руды хранятся в хвостохранилищах предприятий, загрязняя окружающую среду в промышленных зонах. Применение флотационных отходов медно-молибденовых руд МОФ-2 АО «АГМК» в качестве глинистого компонента сырьевой смеси для получения цементного клинкера представляет собой эффективный подход к

расширению номенклатуры техногенных материалов, вовлекаемых в производство портланд-цемента. Такой подход не только способствует повышению ресурсоэффективности промышленного комплекса, но и оказывает положительное влияние на улучшение экологической ситуации в зонах интенсивной промышленной деятельности.

Процесс обжига портландцементного клинкера включает совокупность сложных физико-химических превращений, определяющих формирование фазового состава и эксплуатационных характеристик конечного продукта. Минералы клинкера формируются в результате взаимодействия основных оксидных компонентов — CaO , SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 — в условиях высокотемпературной обработки сырьевой смеси. На ранних стадиях обжига происходит дегидратация глинистых минералов при температуре 250–500°C, далее — разложение карбонатных пород (в частности, известняка) при 850–900°C. Завершение процессов клинкерообразования наблюдается при 1400–1450 °C, когда формируются основные минералы портландцементного клинкера [3, 4].

Портландцементный клинкер — это полу-продукт для производства портланд-цемента. Его получают обжигом сырьевой смеси определенного состава, обеспечивающей образования при высокой температуре (1450 °C) минералов кальциевых силикатов (C_3S и C_2S), алюмината кальция (C_3A) и кальциевого алюмоферрита (C_4AF) [5-8].

Производство цемента является крупнотоннажным, потребляющее огромное количество природного сырья и энергетические ресурсы. Поэтому, замене природного сырья техногенными отходами — источниками альтернативного сырья, придается особое значение.

Материалы и методы исследования. В качестве исходного материала принят клинкер, полученный с использованием флотоотхода медно-молибденовых руд МОФ-2 АГМК при температуре обжига 1380 °C и производственный клинкер АО «Bekabadcement», обожженный при 1450 °C.

Петрографический анализ клинкера проводили на шлифах с применением поляри-

зационного просвечивающего микроскопа МИН-8.

Минералогический состав полученного клинкера определяли в соответствии с общепринятыми расчетными методиками [9], используя данные химического анализа, выполненного по требованиям ГОСТ 5382-2019 «Цементы и материалы цементного производства. Методы химического анализа».

Физико-механические показатели клинкера определены в соответствии стандартных методов.

Обсуждение. Для получения портландцементного клинкера при пониженной температуре обжига (1380°C) в составе сырьевой смеси был использован флотоотход медно-молибденовой руды МОФ-2. Присутствие в его составе легирующих примесей — MnO , P_2O_5 , Cr_2O_3 , а также Cu , Zn и Pb — оказывает выраженное минерализующее воздействие на процессы клинкерообразования. Небольшие количества данных компонентов способствуют снижению прочности кристаллической решетки кальцита и её более быстрому разрушению при пониженных температурах, что, в свою очередь, ускоряет протекание реакций, приводящих к образованию клинкерных минералов [5].

Внешний вид опытного клинкера, обожженного в лабораторной электропечи при 1380°C, приведен на рис.1.



Рис.1. Клинкер из опытной сырьевой смеси, обожженный при 1380 °C.

На снимке клинкера, обожженного при 1380°C (рис. 1) можно увидеть достаточно хорошо спекшийся клинкер. Температура обжига достаточна для образования и формирования клинкерных минералов.

Количество несвязанной извести при этой температуре составляет 1,0%. Клинкер соответствует требованиям ГОСТ по содержанию несвязанной извести.

На рис. 2 представлена петрография клинкера. Микроструктура клинкера своеобразна. Наблюдается неоднородная зернистая микроструктура, со светлыми, серовато-голубоватыми и буровато-зелёными участками различающихся в рииенках. Это типично для клинкера с хорошо кристаллизованным алитом (C_3S) и участкаи белита (C_2S).

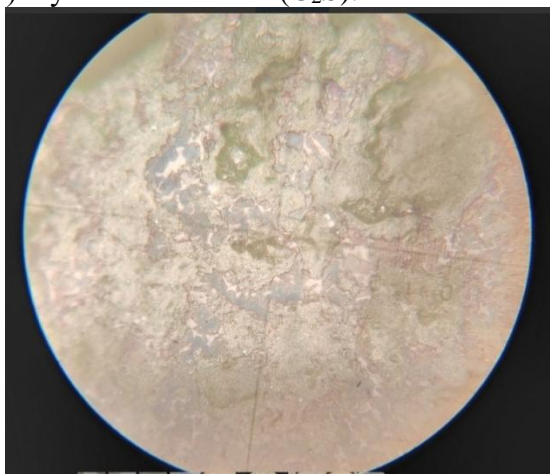


Рис.2. Петрография опытного клинкера (1380 °C).

Участки изометричных зерен с хорошо очерченными границами со светло-серыми до голубоватых оттенками представлены алитом (C_3S), часто с неравномерной внутренней окраской. Размеры кристаллов варьируют в пределах 20–40 мкм. Границы между зернами преимущественно чёткие, местами — слабо-размытые, что свидетельствует о нормальной кристаллизации при высоких температурах.

Участки более тёмные, округлые, с менее чёткими границами - это белит (C_2S), размещённых в межзерновом пространстве. Форма кристаллов субидиоморфная, размер обычно меньше, чем у алита (10–20 мкм).

Мелкозернистая тёмная межзерновая масса представляет межкристаллическую фазу, состоящая из трехкальциевого алюмината (C_3A) и четырехкальциевого алюмоферрита (C_4AF). Характеризуется мелкозернистой структурой и неоднородной окраской от буровато-зелёной до серо-коричневой.

По морфологии зерен и характеру межфазной матрицы можно сделать вывод, что клинкер подвергался нормальному температурному режиму обжига, однако в отдельных участках наблюдаются признаки неравномерного прогрева, выраженные в частичном недожоге или перераспределении фаз. Отсутствие выраженной стекловидной фазы указывает на достаточную выдержку при температуре спекания, а умеренная пористость — на корректный режим охлаждения.

Химический состав клинкера из сырьевой смеси, содержащей в качестве глинистого компонента флотоотход медно-молибденовой руды МОФ-2, следующий (мас. %): SiO_2 – 21,39; Al_2O_3 – 5,88; Fe_2O_3 – 3,55; CaO – 66,76; MgO – 1,33; SO_3 – 0,18. Коэффициент насыщения клинкера $KN = 0,93$ при силикатном модуле $n=2,0$.

На основании химического состава клинкера был рассчитан минералогический состав, который показал образование C_3S – 62,65%; C_2S – 14,06%; C_3A – 9,56%; C_4AF – 10,79%. Содержание несвязанной извести в клинкере $CaO_{св.}=1,0\%$.

Промышленный клинкер АО «Векаbadcement» (образец 1) и экспериментальный клинкер (образец 2) подвергали измельчению в лабораторной шаровой мельнице МБЛ-1 с добавлением 5% гипсового камня. Продолжительность помола сырьевой смеси составляла 40 мин. Для полученных продуктов измельчения определяли остаток на стандартных ситах с размерами ячеек 0,2 и 0,08 мм, а также удельную поверхность. Итоговые данные по остаткам на ситах представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Показатели измельчения клинкеров

Номер клинкера	Содержание клинкера, %	Содержание гипсового камня, %	Время измельчения, минут	Остатки на ситах, %	
				02	008
1	95	5	40	2,9	11,3
2	95	5	40	2,6	10,1

Из приведенных данных видно, что процесс измельчения клинкера зависит от температуры обжига. Производственный клинкер (1) обожжен при 1450°C. Хорошо закристаллизован. Такой клинкер размалывается труднее чем клинкер, обожженный при 1380°C. Поэтому, остатки на ситах 02 и 008 выше, чем у клинкера с использованием отхода флотации медно-молибденовых руд МОФ-2.

Удельная поверхность клинкеров, определенные методом воздухопроницаемости на приборе Т-3, составил соответственно 2955 ва 3175 см²/г.

Сроки схватывания клинкеров и цементов на их основе регламентированы. Как слишком быстрое, так и медленное схватывание являются существенными недостатками. Быстрое затвердевание смеси вызывает неудобства в ее использовании, а медленное затвердевание замедляет строительные работы. Сроки схватывания характеризуются началом и концом схватывания. Результаты определений схватывания производственного и опытного клинкеров приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Сроки схватывания клинкера

Номер клинкера	Остаток на сите 008, %	Удельная поверхность, см ² /г	Время схватывания, час-минут	
			начало	конец
1	11,3	2955	2-50	4-45
2	10,1	3175	2-25	4-35

В целом, сроки схватывания показывает процесс взаимодействия клинкерных минералов водой в начальные сроки. При взаимодействии водой на поверхности клинкерных минералов образуется гидратная оболочка. В дальнейшем межзерновое пространство заполняется гелями гидратации. Наблюдается начало схватывания.

С целью регулирования сроков схватывания в процессе помола клинкера добавляют определенное количество гипсового камня. Гипсовый камень эффективно снижает время схватывания клинкера и цемента. В наших экспериментах количество вводимого гипсового камня составляет 5 мас. %.

Таблица 3.

Физико-механические показатели клинкеров

Номер клинкера	Показатели прочности, МПа			
	изгиб		сжатие	
	2 сут.	28 сут.	2 сут.	28 сут.
1	3,5	8,4	17,3	57,6
2	4,2	7,6	18,1	52,3

Прочностные показатели клинкеров опре-

деляли на стандартных образцах-балочках размером 40x40x160 мм после 2 и 28 суток твердения в нормальных условиях. Физико-механические показатели клинкеров приведены в табл. 3.

Из приведенных данных табл. 3 видно, что по показателю прочности к 28 суткам экспериментальный клинкер соответствует классу прочности 42,5 и по О'MSt 337:2024 Портландцементный клинкер. «Технические условия» к SEM I KP 42,5 О'MSt 337:2024.

Активность производственного клинкера выше чем опытного, которая является следствием обжига при высоких температурах и образования при этом большего количества трехкальциевого силиката. Высокое содержание алита (C₃S) обеспечивает высокие прочностные показатели клинкера.

Заключение. Таким образом, петрографический анализ исследованного образца клинкера показывает, что материал сформировался в условиях нормального обжига с удовлетворительной степенью спекания и кристаллизации основных фаз (C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF). Микроструктура клинкера характеризуется порфировидной текстурой, равномерным распределением алита и белита, а также умеренно развитой межкристаллической фазой, что свидетельствует о хорошем технологическом качестве продукта. Наличие отдельных участков с размытыми границами фаз и признаками микропористости может указывать на незначительные отклонения температурного режима обжига.

Экспериментальный клинкер, полученный с использованием флотоотхода медно-молибденовых руд МОФ-2 АГМК, соответствует классу прочности 42,5 и по О'MSt 337:2024 «Портландцементный клинкер. Технические условия» к SEM I KP 42,5 О'MSt 337:2024 и пригоден для производства общестроительных цементов высокого качества.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Авдохин, В. М. (2006). Основы обогащения полезных ископаемых. Обогащительные процессы (Т. 1). Издательство государственного горного университета.
- [2] Корчевский, А. Н., Назимко, Е. И., Науменко, В. Г., & Звягинцева, Н. А. (2019). Флотационные методы обогащения полезных ископаемых. Донецк: ДОННТУ.

- [3] Зубехин, А. П., & Голованова, С. П. (2009). Химия твердофазовых реакций в теории клинкерообразования. AlitInform: Цемент. Бетон. Сухие строительные смеси, (4–5(11)), 26–30.
- [4] Зубехин, А. П., Голованова, С. П., & Яценко, Е. А. (2012). Физико-химические процессы клинкерообразования в циклонных теплообменниках и декарбонизаторе вращающихся печей. AlitInform: Цемент. Бетон. Сухие строительные смеси, (4–5(26)), 20–29.
- [5] Бутт, Ю. М., Сычев, М. М., & Тимашев, В. В. (1980). Химическая технология вяжущих материалов (В. В. Тимашев, ред.). Москва: Высшая школа.
- [6] Информационно-технический справочник ИТС-6. (2022). Производство цемента (с поправками). Москва.
- [7] Мухамедбаев, А. А., Атаджанов, Ш. Ю., Мухамедбаев, Аф. А., Яичников, Я. М., & Курбанов, Э. И. (2021). Цемент ишлаб чиқариш технологияси: жараён ва қурилмалари. Тошкент: Tafakkur tomchilari.
- [8] Патапова, Е. Н. (n.d.). Производство цемента. В Энциклопедия технологий (Ч. 2, сс. 455–514).
- [9] Бутт, Ю. М., & Тимашев, В. В. (1973). Практикум по химической технологии вяжущих материалов. Москва: Высшая школа.