

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ В РЕЖИМЕ СВС

С.М. Фоменко<sup>1</sup>, А. Акишев<sup>1</sup>, С. Толендиулы<sup>1,2</sup>, Н.Т. Рахым<sup>1,2\*</sup>, Б.А. Нурадинов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева,  
ул. Байтурсынова, 126/1, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

## Аннотация

Данная работа посвящена технологии получения СВС-методом углеродсодержащих огнеупоров с максимальной трансформацией легкоплавких фаз в тугоплавкие с использованием отходов металлургии ферросплавного производства, а также исследованию теплофизических свойств, состава и влияния удельных тепловых потоков на температурные напряжения в условных гипотетических слоях полученных углеродсодержащих СВС-огнеупорных изделий. В качестве сырья использовали шлаки рудотермических печей и кеки, получаемые мокрым улавливанием и фильтрацией осадка пыли. Предложена и опробована технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), по которой в процессе окислительно-восстановительной реакции алюмотермического горения восстановленные металлы, взаимодействуя с углеродом, образуют тугоплавкие карбиды. Легкоплавкие силикаты (фаялит, оливин, монтичеллит и др.) распадаются и оксиды кремния различной модификации вступают в реакцию с оксидом магния, образуя тугоплавкий форстерит, а с оксидами железа, образуя магнезиовюстит ( $MgOFeO$ ) и магнезиоферрит ( $MgOFe_2O_3$ ), тем самым минимизируя количество плавней в материале. Установлено, что в процессе СВ-синтеза количество силикатов (монтичеллита, фаялита) снижается до 0,8-1,5% и увеличивается количество огнеупорных компонентов, в том числе карбида кремния. Рассчитаны температурные напряжения и удельные тепловые потоки при скорости нагрева рабочей поверхности от 4,3 до 55 °С/мин с изотермической выдержкой изделий при 1300 °С, установлена термическая стойкость.

*Ключевые слова:* отходы металлургии, производство, огнеупоры, ферросплавы, шлаки, кек, градиент температуры, рабочая поверхность, СВС – самораспространяющийся высокотемпературный синтез, температурные напряжения, удельный тепловой поток.

## 1. Введение

По данным департамента государственной политики и управления отходами Министерства экологии, геологии и природных ресурсов Казахстана, в стране накопился значительный объем отходов, возникающих в результате деятельности предприятий тяжелой промышленности и аграрного комплекса и т.д. Объем скопившихся отходов превышает тридцать миллиардов тонн. Каждый год образуются новые отходы – более 700 млн. т, которые

размещают на полигонах и хвостохранилищах. Огромные залежи отходов металлургических производств подвергаются естественной минерализации, гидратации, окислению и представляют собой материалы сложного химического состава, изучение которых показало возможность их использования с применением специальных технологических приемов для получения изделий, в основном, строительного назначения. В частности, отходы феррохромсплавного производства в своем составе имеют огнеупорные компоненты:

\*Ответственный автор  
E-mail: nurik\_10\_96@list.ru (Н. Рахым)

различные хромистые, магнезиальные, железистые, корундовые шпинели, сложные хромшпинелиды, которые характеризуются высокими температурами плавления до 2100 °С, а также силикатные минералы – форстерит и его соединения с оксидом хрома (до 1800 °С). Использование их как огнеупорных компонентов ограничивается наличием легкоплавких включений (1200-1300 °С), которые, распределяясь между кристаллами шпинелей, снижают их огнеупорность и деформацию под нагрузкой в целом всего изделия и служат проводниками для проникновения шлаков и расплавов в структурную матрицу материала. Существующие технологии не позволяют блокировать жидкотекучие легкоплавкие силикаты, и поэтому основным направлением производства высококачественных огнеупоров является использование сырья с минимальным содержанием так называемых плавней. Многолетние исследования показывают, что большинство отходов металлургии и химической промышленности включают огнеупорные композиции до 70-90% состава и их относят к некондиционным в связи с высоким содержанием легкоплавких соединений и непостоянства состава. Кроме того, они тяжело поддаются обогащению по огнеупорному компоненту. В большинстве разработок эти отходы используют как сырье для получения строительных материалов, как заполнители бетонов или теплоизоляционных изделий. Однако, многие отходы не пригодны в производстве и не проходят санитарных условий по содержанию вредных и токсичных выделений [1, 2].

Нами разработана технология получения углеродсодержащих огнеупоров из минерального сырья РК, основанная на СВС, известном также как синтез горением. В процессе синтеза химические реакции, которые являются достаточно экзотермическими, могут спонтанно превращаться в огнеупорные продукты при иницировании и распространении через смесь реагентов в виде волны горения. При температурах 1200-1500 °С восстановленные металлы, взаимодействуя с углеродом, образуют тугоплавкие карбиды, которые препятствуют окислению зерен графита [3-5].

Исследования последних лет показывают, что большинство огнеупоров имеет многокомпонентный состав, содержащий легкоплавкие силикаты и тугоплавкие оксиды, шпинели, форстерит, муллит, карбиды и другие вещества, достаточные по свойствам и стойкости к расплавам, в ряде случаев не уступающие по

длительности службы высокочистым материалам [6-8].

К полученным огнеупорам предъявляются повышенные требования не только по эрозионной стойкости к расплавам, но и противодействию напряжениям, возникающим в теле огнеупора при тепловом воздействии. Развитие СВС-технологий и исследования в этой области показали, что при развитии высокотемпературных низкоплазменных процессов при реакционном химическом взаимодействии многокомпонентных составов шихты повышается количество тугоплавких соединений и, соответственно, увеличивается огнеупорность, снижается токсичность материала, которую невозможно получить диффузионным простым спеканием. Рентгенофазовые анализы подтверждают и показывают значительное уменьшение легкоплавких силикатных составляющих [9-11].

Одним из факторов, к которым относятся и силикатные легкоплавкие составляющие огнеупоров, понижающие технические свойства материалов, и тугоплавкие соединения, имеющие свойства другой полярности, являются температурные напряжения, проявляющиеся под действием перепадов, температур, удельных тепловых потоков металлургического процесса и преобразованием многофазовых компонентов, составляющих основу огнеупорных изделий. Силикатная составляющая огнеупора, распределяясь между зернами и в межкристаллических спайках блоков, способствует перекошу температурных напряжений в структуре изделия, тем самым снижая термостойкость огнеупоров.

## 2. Экспериментальная часть

В качестве сырья для получения углеродсодержащих СВС-огнеупоров использовали шлаки рудотермических печей высокоуглеродистого феррохрома (шлак ВУФХ) и кеки, получаемые мокрым улавливанием и фильтрацией осадка пыли.

Рентгенофазовый анализ отходов производства ферросплавов показывает наличие в сырье тугоплавких – магнезиохромита, форстерита, периклаза, алюмомагнезиальной шпинели и легкоплавких минералов в виде монтичеллита и фаялита в кеке, содержащем до 10% оксида железа.

Огнеупорные изделия составов А и В изготавливали путем смешения компонентов шихт на этилсиликатном связующем с добавкой

Таблица 1. Химический состав отходов сырья ферросплавного производства

№	Наименование	Содержание, %							
		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	C	S
1	Шлак ВУФХ	4,67	1,02	23,91	45,65	23,8	0,92	-	-
2	Кек	26,65	0,28	20,39	36,33	4,5	9,55	1,3	0,32

фтористого кальция (2%) для инициирования алюмотермического процесса горения. Смесь компонентов прессовали, сушили и нагревали в печи до температуры 900 °С, при которой в изделии зарождалась волна реакционного горения и перемещалась по всему объему огнеупорного кирпича (рис. 1). Температура на поверхности изделий составляла 1200-1280 °С, внутри, предположительно, она достигала до 2000 °С. Составы углеродсодержащих СВС-огнеупоров и полученные их свойства приведены в таблице 2.

По данным рентгенофазового анализа установлено, что в составе изделий увеличилось содержание огнеупорных фаз в виде магнезиоферрита, дополнительного форстерита кар-

бида кремния, свободного углерода, оксидов магния и алюминия.

Измерение температуры в гипотетических слоях огнеупоров при различных режимах нагрева проводили на разработанной экспериментальной установке (рис. 2). Исследуемый огнеупорный углеродсодержащий материал в форме прямоугольного кирпича (С) устанавливали в горловине (В) электропечи (А) и тщательно изолировали от потери тепла в окружающую среду. В заданных точках изделий устанавливали термопары (1,2,3,4,5) по ее гипотетическим слоям. Холодные концы термопар соединяли с мультимерами (D) для регистрации температурных показателей с выводом их на дисплей компьютера (E).

Таблица 2. Составы исследуемых огнеупоров

№	Наименование	Содержание, %							Свойства обожженных изделий	
		Кек 5-0 мм	Шлак ВУФХ 5-0 мм	Al	Si	C 2-0,5 мм	C <0,063	CaF <sub>2</sub>	Прочность, МПа	Открытая пористость, %
1	Состав А	26,5	26,5	16,0	4,0	20,0	5,0	2,0	16,7	14,3
2	Состав В	53,0	-	16,0	4,0	20,0	5,0	2,0	14,5	16,2



Рис. 1. Процесс СВ-синтеза углеродсодержащих кирпичей.

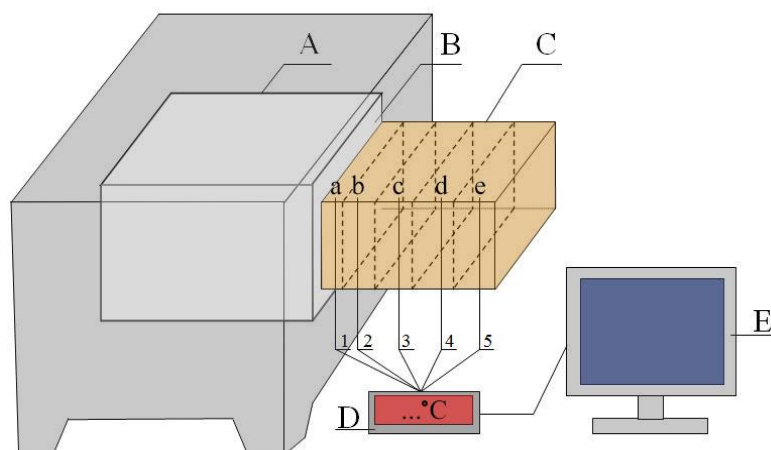


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования изменения температурных показателей, расчетных удельных тепловых потоков и напряжений до 1300 °С в огнеупорных углеродсодержащих СВС-изделиях: А – электрическая печь; В – горловина печи для установки исследуемого огнеупора; С – исследуемое огнеупорное изделие с теплоизоляцией; D – мультимеры; E – дисплей компьютера; a, b, c, d, e – точки установки термопар по установленным гипотетическим слоям огнеупорного изделия: a – торец; b – 10 мм; c – 35 мм; d – 60 мм; e – 90 мм; 1, 2, 3, 4, 5 – термопары.

В процессе исследований были использованы: 1 – медленный нагрев рабочей поверхности (торца) в установленном режиме печи до 1300 °С; 2 – ускоренный нагрев рабочей поверхности от установленных температур 700, 950 и 1300 °С путем предварительного нагрева печи до заданной температуры и установке в ее горловине подготовленного теплоизолированного образца кирпича с закрепленными термопарами, соединенными с мультимерами для регистрации температуры. Установку исследуемого образца осуществляли на специальной подвижной роликовой каретке, при помощи которой образец помещался в горловину нагретой до заданной температуры печи на глубину до 10 мм от края и уплотнялся от теплопотерь теплоизоляционным материалом.

Послойное измерение температур от нагреваемой рабочей поверхности при медленном нагреве (от 25 °С температуры изделия) и регулируемом ускоренном режиме в нагретой печи при температурах выдержки 700 °С, 950 °С и 1300 °С позволило рассчитать величины удельных тепловых потоков и температурных напряжений и их распределение в структуре исследуемых слоев изделия по глубине их расположения: a – рабочая поверхность; b – 0,01 м от торца; c – 0,035 м; d – 0,06 м; e – 0,09 м.

Тепловой поток (Q) – количество тепла, переносимого через толщину углеродсодержащего изделия (кирпича), рассчитывалось по разнице температур (ΔT) в градусах Кельвина между исследуемыми гипотетическими слоя-

ми (b, c, d, e), глубины слоя (L), м, площади (A) м<sup>2</sup> сечения материала и значений теплопроводности (λ), Вт/мК, установленных экспериментально при заданной температуре (рис. 2) для состава В, содержащего кек, и состава А – смесь кека и шлака, как основных компонентов шихты по формуле (1).

$$Q = (A \cdot \Delta T \cdot \lambda) / L, \quad (1)$$

Удельный тепловой поток определялся по формуле (2) делением теплового потока Q на площадь исследуемого огнеупора A, рассчитанного в квадратных метрах:

$$q = Q/A, \text{ Вт/м}^2 \quad (2)$$

Разницу температур гипотетических слоев определяли с пересчетом в градусы Кельвина, A – площадь сечения рабочей поверхности огнеупора рассчитывалось по размерам торцевой части кирпича (0,005x0,115) м.

Расчет температурных напряжений проводился по формуле (3)

$$\sigma = (E \cdot \alpha \cdot \Delta T) / (1 - \mu), \text{ МПа} \quad (3)$$

где: σ – величина термонапряжения, МПа; E – модуль упругости Юнга, МПа; α – коэффициент линейного термического расширения огнеупора, °С<sup>-1</sup>; ΔT – разность температур между гипотетическими слоями огнеупора, °С; μ – коэффициент Пуассона.



По результатам расчетов температурных напряжений ( $\sigma$ , МПа) и удельных тепловых потоков ( $q$ , кВт/м<sup>2</sup>) построены графические зависимости от времени (мин) по гипотетическим слоям:  $\sigma_{0,01}$ ,  $q_{0,01}$  – 0,01 м;  $\sigma_{0,035}$ ,  $q_{0,035}$  – 0,035 м;  $\sigma_{0,06}$ ,  $q_{0,06}$  – 0,06 м;  $\sigma_{0,09}$ ,  $q_{0,09}$  – 0,09 м.

При замедленном режиме термического воздействия на материал его рабочей поверхности от 25 до 1300 °С в течение 200 мин наблюдается равномерное течение удельных тепловых потоков по слоям, расположенным на глубинах от рабочей поверхности в соответствующей последовательности – 0,01, 0,035, 0,06 и 0,09 метра с его увеличением по мере повышения температуры.

Наиболее высокие температурные напряжения возникают при ускоренном режиме термического воздействия на материал. Ускоренный процесс теплового воздействия, в отличие от медленно-равномерного нагревания изделия, осуществлялся помещением материала в нагретую до температуры 1300 °С печь, что приводило к интенсификации удельных тепловых потоков со значительным возрастанием температурных напряжений.

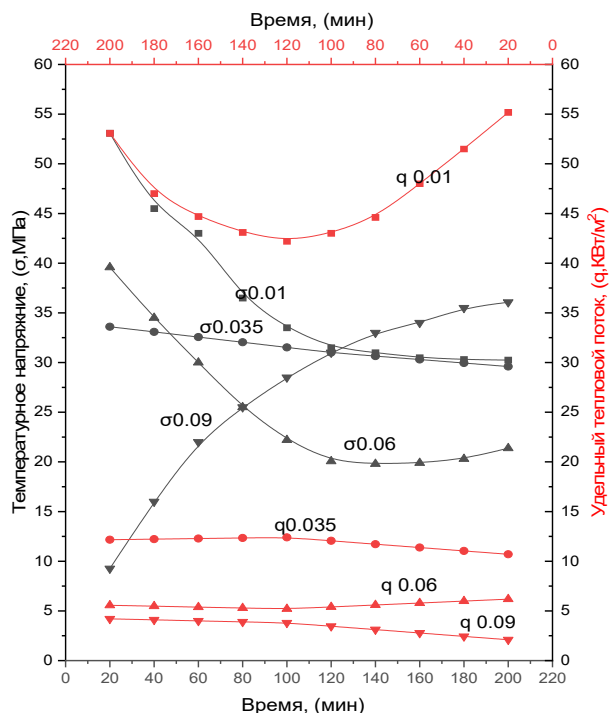


Рис. 3. Кривые изменений температурных напряжений ( $\sigma$ ), удельных тепловых потоков ( $q$ ) в гипотетических слоях (0,01 м; 0,035 м; 0,06 м; 0,09 м) углеродсодержащего СВС-огнеупора состава А в ускоренном режиме нагревания изделий 55 °С/мин – с изотермической выдержкой при температуре 1300 °С.

Расчетные данные температурных напряжений и удельных тепловых потоков при ускоренном режиме нагревания составов А и В, полученные по показаниям температурных кривых, отражены на рис. 3 и 4, на которых установлены физико-химические проявления материалов изделия с изотермической их выдержкой при температуре 1300 °С.

Исследование термических напряжений показало, что важными параметрами при изучении термической стойкости огнеупоров являются начальные величины температурного воздействия на материал, испытывающий физико-механические нагрузки. При этом в материале тепловые потоки условно распределяются по гипотетическим слоям, величина которых зависит от таких свойств, как теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность, коэффициент линейного термического расширения и механических свойств кристаллической структуры – спаянность и размеры кристаллов, химический и фазовый состав изделий.

Наиболее высокие температурные напряжения (рис. 3) в составе, содержащем кек и шлак, развиваются в слое 0,01 м, приближен-

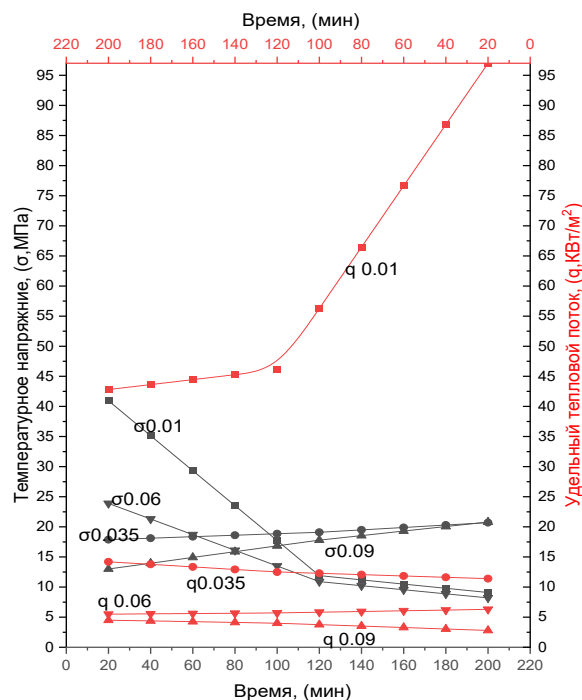


Рис. 4. Кривые изменений температурных напряжений ( $\sigma$ ), удельных тепловых потоков ( $q$ ) в гипотетических слоях (0,01 м; 0,035 м; 0,06 м; 0,09 м) углеродсодержащего СВС-огнеупора состава В в ускоренном режиме нагревания изделий 55 °С/мин с изотермической выдержкой при температуре 1300 °С.

ном к рабочей (генерирующей тепло) поверхности изделия, имеющей максимальное сосредоточение удельных тепловых потоков: при 1300 °С – 55,18 кВт/м<sup>2</sup> с соответствующими проявлениями температурных напряжений – 38,26 МПа.

Эти показатели характеризуют, что с повышением температуры напряжения концентрируются в глубоких слоях огнеупорного материала (0,09 м), в то время как в слоях, приближенных к поверхности, генерирующееся тепло, происходит ее рассеивание.

Изучение кривых, изображенных на рис.4, полученных на основе состава В, содержащего кек, показывает значительное отличие показателей температурных напряжений от состава А (кек, шлак). При соответствующих условиях удельные тепловые потоки рабочей поверхности, которые формируют напряжение огнеупора состава В, имеют значение для слоя 0,01 м – 61,9 кВт/м<sup>2</sup> (1300 °С).

Сравнивая полученные данные показателей состава А и состава В, установлено, что удельные тепловые потоки, воспринимаемые рабочей поверхностью материалов, при равных условиях проведения опыта отличаются. Однако с повышением температуры (1300 °С) увеличивается коэффициент линейного термического расширения материала, изменяя ее структуру, что отражается на свойстве изделия – уменьшаются теплопроводность и проникновение тепловых потоков (до 12,18%).

Быстрое освобождение энергии температурного напряжения в верхних гипотетических слоях и высокие температуры расширяют структуру материала, в то время как нижние слои концентрируют напряжения, сохраняя порочность за счет высокой контактной их стойкости. Это явление противодействия разрушению структуры материала характеризует его термостойкость, она складывается из многочисленных критериев, основными из которых являются: коэффициенты теплопередачи, структура, размер, форма и химико-минеральное распределение составляющих фаз в изделии.

### 3. Заключение

Исследованы шлаки высокоуглеродистого феррохрома (ВУФХ) и кеки ферросплавного производства в качестве сырья для получения огнеупорных углеродсодержащих СВС-материалов. Показано, что СВС-технология позволяет увеличивать в составе масс количество

огнеупорных фаз с уменьшением легкоплавких силикатных составляющих в результате их распада при термохимической реакции.

Разработаны и оптимизированы углеродсодержащие составы шихт состава А (шлак и кек) и состава В (кек) с добавками алюминия, кремния, фракционного состава и определены их технические свойства, а также фазово-минеральный состав.

Рассчитаны температурные напряжения и удельные тепловые потоки при скорости нагрева рабочей поверхности от 4,3 до 55 °С/мин с изотермической выдержкой изделий при 1300 °С, установлена термическая стойкость.

По температурным градиентам в промежуточных гипотетических слоях СВС-изделий составов А и В установлены коэффициенты критериальной термической стойкости по отношению прочности к температурному напряжению, которые показали, что термостойкость не является постоянной величиной и она может повышаться или снижаться в зависимости от состава, температуры или структуры огнеупора.

### Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP08857429).

### Литература

- [1]. Кащеев И.Д., Ладыгичев М.Г., Гусовский И.С. Неформованные огнеупоры, Справочное издание в 2-х томах. Свойства и применение неформованных огнеупоров. – М.:Теплоэнергетик, 2003. – 400 с.
- [2]. Замятин С.Р., Пургин А.К., Хорошавин Л.Б. и др. Огнеупорные бетоны. Справочник. – М.:Металлургия. – 1982. – 192 с.
- [3]. Mansurov Z.A., Fomenko S.M. Carbonaceous Refractory Materials on SHS-technology // Advances in Science and Technology. – 2014. – Vol.88. – P.94-103. Online available since 2014/Oct/31 at www.scientific.net
- [4]. Фоменко С.М., Кунес З., Абдулкаримова Р.Г., Акишев А. СВ-синтез композиционных огнеупорных материалов на основе минерального сырья в режиме технологического горения // Промышленность Казахстана. – 2021. – Т.1 – С.76-81.
- [5]. Fomenko S.M., Tolendiuly S., Akishev A.Kh., Almagambetov M., Yeskendirov R. The

- Technology for Producing Refractory Products Based Metallurgical Production Waste // AIP Conference Proceeding. – 2021. – P.2380.
- [6]. Бережной А.С. Многокомпонентные щелочные оксидные системы / А.С. Бережной. – Киев: Наукова думка, 1998. – 200 с.
- [7]. Рывтин В.М., Перепелицын В.А., Пономаренко А.А., Гильварг С.И. Феррохромовые алюминотермические шлаки – техногенное сырье многофункционального применения. Часть 1. Вещественный состав и свойства феррохромовых шлаков // Новые огнеупоры. – 2017. – №10. – С.8-14.
- [8]. Уайт Д.Ж. Факторы, определяющие структуру многофазной керамики / Дж. Уайт-керамика: Сб. трудов I и II конференции Британского и Голландского керамических обществ: пер. с англ. – М.: Металлургия, 1967. – 140-161 с.
- [9]. Menshov P.V., Khlupin Y.V., Makarovskikh A.V. Procedia Chemistry. – 2014. – №10. – P.184-191.
- [10]. Зиятдинов М.Х., Шатохин И.М., Леонтьев Л.И. СВС-технология композиционных ферросплавов. Часть 1. Металлургический СВС-процесс. Синтез нитридов феррованадия и феррохрома // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2018. – Т.61, №5. – С.339-346.
- [11]. Lopes A.B. The influence of ferrosilicon Nitride on the Performance of the Modern Tapfole mud for Blast Furnace // Refractories Applications and News. – 2002. – Vol.7, №5. – P.26-30.
- shchelochnye oksidnye sistemy] Naukova Dumka, Kiev, Ukraina. ISBN 5-12-000207-2. (in Russian)
- [7]. Rytvin VM, Perepelitsyn VA, Ponomarenko AA, Gil'varg SI (2017) New refractories [Novye огнеупоры]. 10:8–14. (in Russian)
- [8]. White J (1967) Ceramics: Collected Works of the I and II conference of the British and Dutch ceramic societies: translated from English [Keramika: Sbornik Trudov I i II konferencii Britanskogo i Gollandskogo keramicheskikh obshchestv: perevod s anglijskogo]. Metallurgy, Moscow. (in Russian)
- [9]. Menshov PV, Khlupin YV, Makarovskikh AV (2014) Procedia Chemistry 10:184-191. DOI: 10.1016/j.proche.2014.10.032
- [10]. Ziatdinov MH, Shatokhin IM, Leontiev LI (2018) Izvestiye vuzov. Ferrous metallurgy [Izvestie vuzov. Chernaya metallurgiya] 61(5):339-346. (in Russian)
- [11]. Lopes AB (2002) Refractories Applications and News 7(5):26-30.

## References

- [1]. Kashcheev ID, Ladygichev MG, Gusovskiy IS (2003) Properties and application of unshaped refractories [Svoystva i primeneniye neformovannykh огнеупоров] Teploenergetik, Moscow, Russia. ISBN 5-902202-16-7. (in Russian)
- [2]. Zamyatin SR, Purgin AK, Khoroshavin LB (1982) Refractory concrete. Directory. [Ogneupornye betony. Spravochnik] Metallurgy, Moscow. (in Russian)
- [3]. Mansurov ZA, Fomenko SM (2014) Advances in Science and Technology. 88:94-103. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AST.88.94
- [4]. Fomenko SM, Kunis Z, Abdulkarimova RG, Akishev A (2021) Industry of Kazakhstan [Promyshlennost' Kazahstana] 1:76-81. (in Russian)
- [5]. Fomenko SM, Tolendiuly S, Akishev AKh, Almagambetov M, Yeskendirov R (2021) AIP Conference Proceeding 2380. DOI: 10.1063/5.0058302
- [6]. Berezhnoy AS (1998) Multicomponent alkaline oxide systems [Mnogokomponentnye

## Investigation of the thermal properties of carbon-containing refractory materials obtained from metallurgical waste in the SHS method

S.M. Fomenko<sup>1</sup>, A.Akishev<sup>1</sup>, S. Tolendiuly<sup>1,2</sup>, N.T. Rakhym<sup>1,2\*</sup>, B.A. Nuradinov<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Combustion Problems, 172 Bogenbai Batyr str., Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, 126/1 Baytursynuli str., Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi ave., Almaty, Kazakhstan

## Abstract

This work is devoted to the technology of obtaining carbon-containing refractories by the SHS method with maximum transformation of low-melting phases into refractory ones using waste metallurgy of ferroalloy production, as well as to the study of thermophysical properties, composition and the effect of specific heat fluxes on temperature stresses in conditional hypothetical layers of obtained carbon-containing SHS-refractory products. Slags from ore-thermal furnaces and cakes obtained by wet trapping and filtering of dust sediment were used as raw materials. The technology of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) was proposed

and tested, according to which, in the process of the redox reaction of aluminothermal combustion, reduced metals, interacting with carbon, form refractory carbides, and low-melting silicates (fayalite, olivine, monticellite, etc.) decompose and silicon oxides of various modifications react with magnesium oxide to form refractory forsterite and with iron oxides to form magnesioferrite ( $MgOFeO$ ) and magnesioferrite ( $MgOFe_2O_3$ ), etc., thereby minimizing the amount of fluxes in the material. It has been established that in the process of SH-synthesis, the amount of silicates (monticellite, fayalite) decreases to 0.8-1.5% and the amount of refractory components, including silicon carbide, increases. Temperature stresses and specific heat fluxes are calculated at the heating rate of the working surface from 4.3 °C/min to 55 °C/min with isothermal exposure of products at 1300 °C. thermal resistance is established.

*Keywords:* metallurgy waste, production, refractories, ferroalloys, slags, cake, temperature gradient, working surface, SHS – self-propagating high-temperature synthesis, temperature stresses, specific heat flux.

### **ӨЖС режимінде металлургиялық қалдықтардан алынған көміртегі бар отқа төзімді материалдардың жылу термиялық қасиеттерін зерттеу**

С.М. Фоменко<sup>1</sup>, А. Акишев<sup>1</sup>, С. Толендиулы<sup>1,2</sup>, Н.Т. Рахым<sup>1,2\*</sup>, Б.А. Нурадинов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр көшесі, 172, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Г.Ж. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Байтурсынұлы көшесі, 126/1, Алматы, Қазақстан

<sup>3</sup>Әль-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, әль-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан

### **Аңдатпа**

Бұл жұмыс Ферроқорытпа өндірісіндегі металлургия қалдықтарын пайдалана оты-

рып, жеңіл балқитын фазаларды отқа төзімді фазаларға барынша түрлендіре отырып ӨЖС әдісімен, құрамында көміртегі бар отқа төзімді заттарды алу технологиясына, сондай-ақ құрамында көміртегі бар ӨЖС-отқа төзімді бұйымдардың шартты гипотетикалық қабаттарындағы жылу ағындарының термодинамикалық қасиеттерін, құрамы мен температуралық кернеулерге әсерін зерттеуге арналған. Шикізат ретінде ылғал ұстау және шаң шөгінділерін сүзу арқылы алынған кенді термиялық пештердің қождары мен шаңдары пайдаланылды. Аллюминотермиялық жанудың тотығу-тотықсыздану реакциясы процесінде көміртеппен әрекеттесіп, тотықсызданған металдар отқа төзімді карбидтер түзілетін, ал оңай балқитын силикаттар (фаялит, оливин, монтичеллит және т.б.) ыдырайды және әртүрлі модификациядағы кремний оксидтері магний оксидімен әрекеттесіп, отқа төзімді форстерит және темір оксидтерімен әрекеттесіп, магнезиовюстит ( $MgOFeO$ ) және магнезиоферрит ( $MgOFe_2O_3$ ) және т. б. түзеді, осылайша материалдағы ағындардың көлемін барынша азайтатын өздігінен таралатын жоғары температуралық синтездің (ӨЖС) технологиясы ұсынылды және сыналды. ӨЖС-синтез процесінде силикаттардың (монтичеллит, фаялит) мөлшері 0,8-1,5%-ға дейін төмендейтіні және отқа төзімді компоненттердің, соның ішінде кремний карбидінің мөлшері арта түсетіні анықталды. Жұмыс бетінің қыздыру жылдамдығы 4,3 °C/мин-ден 55 °C/мин-ге дейінгі аралықта 1300 °C температурада изотермиялық ұстау кезінде бұйымдардың температуралық кернеулері мен меншікті жылу ағындары есептелінді, термиялық төзімділік анықталды.

*Кілт сөздер:* металлургия қалдықтары, өндіріс, отқа төзімді материалдар, ферроқорытпалар, шлак, шаң, температура градиенті, ӨЖС – өздігінен таралатын жоғары температуралық синтез, температуралық кернеулер, меншікті жылу ағыны.