

PAPER

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЛЕГКИХ ОБОЖЖЕННЫХ КИРПИЧЕЙ С ВЫСОКИМИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ НА ОСНОВЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ (ЛЕТУЧАЯ ЗОЛА И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ШЛАКИ) И ИХ ФИЗИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Дадаханов Фаррух Адхамович ^{1,*}

¹ Преподаватель, «Наманганский государственный технический университет»

* adrenverb@gmail.com

Abstract

В данной статье исследуются разработка и оптимизация экологически устойчивой технологии производства легких обожженных кирпичей с улучшенными теплоизоляционными свойствами с использованием промышленных отходов в качестве основного сырья. Исследование сосредоточено на рецептурах, включающих летучую золу тепловых электростанций и металлургические шлаки, с целью снижения воздействия на окружающую среду и утилизации вторичных ресурсов. Процесс производства включает смешивание, формование и обжиг при контролируемых температурах для получения пористой микроструктуры. Представлен комплексный анализ физических и механических свойств произведенного кирпича, включая насыпную плотность, прочность на сжатие, водопоглощение и теплопроводность. Результаты показывают, что оптимизированные составы позволяют получить легкий кирпич со значительно сниженной плотностью и теплопроводностью по сравнению с традиционным глиняным кирпичом, при этом сохраняя удовлетворительную механическую прочность для использования в несущих и изоляционных кладках. Исследование подтверждает техническую осуществимость преобразования летучей золы и металлургических шлаков в высокоэффективные экологически чистые строительные материалы, что способствует как утилизации отходов, так и повышению энергоэффективности зданий.

Key words: Легкие обожженные кирпичи; теплоизоляция; летучая зола; металлургический шлак; промышленные отходы; устойчивое строительство; прочность на сжатие; теплопроводность; пористая микроструктура; утилизация отходов

Введение

Строительная отрасль является огромным потребителем природных ресурсов и значительным источником глобальных выбросов углерода, на долю которой приходится примерно 37 % глобальных выбросов CO₂, связанных с энергетикой, согласно Отчету о глобальном состоянии зданий и строительства за 2022 год. В рамках этого сектора традиционные обожженные глиняные кирпичи, годовое производство которых превышает 1,5 триллиона штук, представляют собой постоянную экологическую проблему из-за необходимости выемки верхнего слоя почвы, высокоэнергоемких процессов обжига (обычно при температуре 900–1200 °C) и значительного количества углерода, заложенного в них. Одновременно с этим промышленный рост приводит к образованию огромных объемов твердых отходов; например, мировое производство угольной золы оценивается в более чем 1,2 миллиарда тонн в год, при этом коэффициент ее использования составляет всего около 65–70%, в результате чего сотни миллионов тонн отходов попадают на свалки. Аналогичным образом, металлургический сектор ежегодно производит 400–500 миллионов тонн шлака. Неправильное обращение с этими отходами, богатыми алюмосиликатами, создает серьезную угрозу загрязнения почвы, воды и воздуха, превращая их из потенциальных ресурсов в экологическую проблему.

Этот двойной кризис, связанный с истощением ресурсов и накоплением отходов, стал катализатором интенсивных исследований в области устойчивых альтернативных строительных материалов. Парадигма циркулярной экономики требует преобразования промышленных побочных продуктов в материалы с добавленной стоимостью. Легкие обожженные кирпичи с высокими теплоизоляционными свойствами становятся важным решением, позволяющим не только утилизировать отходы, но и удовлетворить насущную потребность в энергоэффективных строительных конструкциях.

Улучшение тепловых характеристик стеновых материалов может снизить энергопотребление зданий на 30–40%, что напрямую способствует достижению целей по смягчению последствий изменения климата. Научная задача заключается в создании микроструктурной пористости в обожженной керамической матрице, полученной из потоков отходов, сбалансировав часто обратную зависимость между легкостью/теплоизоляцией и механической прочностью.

Предыдущие исследования продемонстрировали частичное включение отдельных потоков отходов, таких как летучая зола или шлак, в глиняные массы. Однако эти подходы часто сталкиваются с ограничениями: летучая зола сама по себе может снижать пластичность и ограничивать прочность в сыром состоянии, а чрезмерное содержание шлака может приводить к неконтролируемому остекловыванию и деформации во время обжига. Синергетическая формула, сочетающая в себе летучую золу и металлургический шлак, представляет собой более сложную систему материалов. Взаимодополняющие химические составы, в которых летучая зола (богатая SiO₂ и Al₂O₃, со сферической морфологией частиц) может действовать в качестве наполнителя и флюса, а шлак (со значительным содержанием CaO, MgO и латентными гидравлическими свойствами) может способствовать образованию низкотемпературных силикатов, дают возможность адаптировать поведение при обжиге и конечные свойства. Механизмы образования пор, обусловленные сторанием остаточного углерода в летучей золе, выделением газов из компонентов шлака и контролируемым выгоранием дополнительных органических добавок, являются ключом к достижению однородной изолирующей структуры пор.

Методология

Характеристика и подготовка материалов. Сырье: Зола класса F была получена из установки по сжиганию пылевидного угля, а шлак из

кислородной конвертерной печи был получен из интегрированного металлургического завода. Была проведена полная минералогическая химическая и морфологическая характеристика. Ключевые параметры: Летучая зола LOI: 5,2%, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$: 84,7%; Шлак доменной печи: Основность (CaO/SiO_2): 2,1, содержание Fe_2O_3 : 18,5%.

Предварительная обработка: шлак был измельчен в щековой дробилке, пропущен через шаровую мельницу и просеян до достижения размера частиц <75 мкм. Летучая зола использовалась в полученном виде для сохранения сферической морфологии частиц и содержания углерода.

Экспериментальный дизайн и изготовление образцов

Был использован полный факторный план экспериментов с тремя независимыми переменными:

Соотношение летучей золы и шлака (FA:S): 70:30, 60:40, 50:50, 40:60 (по сухой массе).

Температура обжига (T_f): 950 °C, 1000 °C, 1050 °C, 1100 °C.

Продолжительность обжига при пиковой температуре (td): 1 час, 2 часа.

Для сравнения был подготовлен контрольный набор образцов с 10% каолиновой глины в качестве пластификатора для одной смеси. Для каждого из 32 основных составов (4 соотношения \times 4 температуры \times 2 продолжительности) было изготовлено 10 образцов кирпичей (40x40x160 мм). Процесс включал: сухую гомогенизацию порошков \rightarrow добавление 12% воды (оптимизированное с помощью испытаний индекса пластичности) \rightarrow одноосное прессование при 15 МПа \rightarrow сушку при 110 °C в течение 24 часов \rightarrow обжиг в программируемой электрической печи со скоростью нагрева 3 °C/мин до пиковой температуры.

Методы анализа и испытаний. Физические свойства: Насыпная плотность и кажущаяся пористость были определены по принципу Архимеда. Линейная усадка была измерена после обжига.

Механические свойства: Прочность на сжатие проверялась на универсальной испытательной машине. Была разработана прогнозная модель прочности (σ_c) на основе плотности (ρ) и пористости (p) с использованием формулы $\sigma_c =$

$k\rho^n \exp(-bp)$.

Тепловые свойства: Теплопроводность (λ) при 25 °C измерялась с помощью защищенного прибора с нагревательной пластиной (ISO 8302). Анализ микроструктуры пор (средний размер пор, распределение) с помощью ртутной интрузионной порозиметрии (MIP) был соотнесен с λ с использованием модифицированной модели Максвелла–Эуккена.

Микроструктурный и фазовый анализ: обожженные образцы были проанализированы с помощью XRD (X-ray Diffraction) для идентификации кристаллических фаз (например, муллит, анортит, геленит, гематит) и SEM (Scanning Electron Microscopy) для изучения степени остеклования, толщины стенок пор и схем распространения трещин. Дифференциальный термический анализ (DTA/TG) сырых тел был использован для отслеживания эндо/экзотермических явлений (выгорание углерода, разложение карбонатов, фазовые превращения).

Результаты

Эволюция фаз и развитие микроструктуры.

Анализ XRD выявил решающее изменение кристаллических фаз, обусловленное соотношением FA:S и температурой обжига. Для составов с высоким содержанием летучей золы (FA:S 70:30), обжигаемых при 1100 °C, основной кристаллической фазой был муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), составляющий примерно 18–22 % кристаллической фракции, наряду с остатками кварца из летучей золы. Это указывает на огнеупорные свойства и неполное спекание при более низких температурах. Напротив, образцы с повышенным содержанием шлака (FA:S 50:50 и 40:60) продемонстрировали переход к анортиту ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) и гелениту ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) в качестве доминирующих фаз при температурах всего 1050 °C. При оптимальном соотношении 60:40 наблюдалось смешанное фазовое собрание анортита, гематита (Fe_2O_3) и уменьшенного кварцевого пика, что свидетельствовало о повышенной реакционной способности. Кривые ДТА/ТГ подтвердили два критических эндотермических события: широкий экзотермический процесс между 350–550 °C, соответствующий сгоранию несгоревшего углерода в летучей золе (потеря массы: 4,1–5,0%), и

резкий эндотермический процесс при 680–720 °С, связанный с декарбонизацией остаточных карбонатов в шлаке. Временные характеристики и интенсивность данных процессов подтверждены как основные факторы, определяющие формирование пор.

Состав 70:30 показал неоднородную структуру с большими нерегулярными порами (50–200 мкм) от выгорания углерода, плохо интегрированными в частично спеченную матрицу. Напротив, состав 40:60 продемонстрировал чрезмерное остекловывание при 1100 °С, с коалесценцией пор, приводящей к раздутой структуре и ослаблению стенок. Состав 60:40, обжигаемый при 1050 °С в течение 2 часов, продемонстрировал оптимальную микроструктуру: однородное распределение сферических и закрытых пор (средний диаметр: 45 ± 12 мкм, согласно анализу МПР), встроенных в плотную, непрерывную остеклованную матрицу. Стенки пор демонстрировали признаки вязкого течения спекания, при этом кальций-алюмосиликатное стекло, полученное из шлака, эффективно связывало сферы летучей золы.

Физические и механические свойства. Насыпная плотность обожженных образцов продемонстрировала сильную параболическую зависимость как от состава, так и от температуры ($R^2 = 0,94$ для прогнозной модели). Плотность варьировалась от максимальной $1,65 \text{ г/см}^3$ для состава 70:30 при 950 °С (неполное спекание) до минимальной $0,98 \text{ г/см}^3$ для состава 40:60 при 1100 °С (пережигание и вздутие). Целевой диапазон плотности $1,0\text{--}1,2 \text{ г/см}^3$ был стабильно достигнут в узком диапазоне технологических параметров: соотношение FA:S от 55:45 до 60:40 и температура обжига 1025–1075 °С. Соответствующая кажущаяся пористость для этих оптимальных образцов колебалась от 42 % до 48 %, что значительно выше, чем 25–35 %, характерных для обычных глиняных кирпичей.

Несмотря на высокую пористость, оптимизированные образцы ($\rho_b \sim 1,15 \text{ г/см}^3$) достигли средней прочности на сжатие $10,8 \pm 1,2$ МПа, превысив порог 7,5 МПа для не несущих кладочных блоков. Максимальная прочность 14,3 МПа была зафиксирована для состава 50:50, обожженного при 1050 °С ($\rho_b = 1,32 \text{ г/см}^3$). Это демонстрирует, что компромисс между прочностью и пористо-

стью был благоприятно сдвинут за счет развития прочной матрицы со стеклянной связью.

Теплопроводность (λ) демонстрировала экспоненциальное снижение с увеличением пористости и линейную корреляцию со снижением плотности. Измеренные значения λ варьировались от $0,52 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ для наиболее плотных образцов с низкой пористостью ($1,65 \text{ г/см}^3$) до замечательных $0,24 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ для высокопористых легких образцов ($0,98 \text{ г/см}^3$). Оптимизированные кирпичи ($\rho_b \sim 1,15 \text{ г/см}^3$, пористость $\sim 45\%$) демонстрировали теплопроводность в диапазоне $0,28\text{--}0,31 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$. Это представляет собой снижение на 55–60 % по сравнению с типичной теплопроводностью традиционных глиняных кирпичей ($\sim 0,7 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$). Данные МПР подтвердили, что более 70 % объема пор в этих оптимальных образцах состояло из закрытых пор размером менее 100 мкм, которые очень эффективно минимизируют теплопередачу за счет проводимости и конвекции в порах. Модифицированная модель Максвелла–Эуккена соответствовала экспериментальным данным λ с погрешностью менее 5 %, подтверждая, что закрытая пористость является доминирующим изолятором.

Заключение

В заключение, эта работа переводит предложение по использованию кирпичей на основе отходов из разряда второстепенных дополнительных материалов в разряд высокоэффективных инженерных керамических решений. Она предоставляет проверенную научную основу, включающую прогнозные модели взаимосвязей между составом, обработкой и свойствами, которые могут быть адаптированы к региональным особенностям потоков отходов. Внедрение этой технологии в промышленных масштабах может создать существенную связь между энергетическим, металлургическим и строительным секторами, одновременно решая важнейшие задачи эффективного использования ресурсов, сокращения выбросов углерода и устойчивого развития городов. Будущие исследования должны быть направлены на комплексную оценку долговечности, пилотные испытания производства и интеграцию этих периферийных строительных блоков в полные модели энергоэффективности зданий, чтобы полно-

стью количественно оценить их системные экологические и экономические преимущества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахмари, С., и Чжан, Л. (2013). Производство экологически чистых кирпичей из отходов медных рудников посредством геополимеризации. *Строительство и строительные материалы*, 29, 323–331. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.048>
2. Глобальный альянс по зданиям и строительству. (2022). Отчет о глобальном состоянии зданий и строительства за 2022 год. Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде. Получено с <https://globalabc.org>
3. Американская ассоциация угольной золы (АСАА). (2021). Отчет об исследовании производства и использования продуктов сжигания угля (ССР). АСАА.
4. Euroslag. (2022). Статистика 2022: данные по шлаку. Европейская ассоциация производителей и переработчиков металлургического шлака. Источник: <https://www.euroslag.com>
5. Zhang, L. (2013). Производство кирпича из отходов – обзор. *Строительство и строительные материалы*, 47, 643–655. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043>
6. Bories, C., Vedrenne, E., Paulhe-Massol, A., Vilarem, G., & Sablayrolles, C. (2016). Разработка пористых обожженных глиняных кирпичей с добавками на биологической основе: исследование воздействия на окружающую среду. *Чистые технологии и экологическая политика*, 18(6), 1955–1966. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1170-7>
7. Cultrone, G., & Sebastián, E. (2009). Добавление летучей золы в глинистые материалы для улучшения качества твердых кирпичей. *Строительство и строительные материалы*, 23(2), 1178–1184. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.001>