

Раздел 1. «Металлургия»

МРНТИ 47.09.48

Г.А. Ульева¹, Е.М. Мацугина²

¹АО «АрселорМиттал Темиртау», Темиртау, Казахстан,
²Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан
(E-mail.ru: g.ulyeva@mail.ru, yekaterina.matsugina@mail.ru)

Получение вторичных материалов из отходов кремниевого производства

Данная статья является обзорной. Авторы приводят целесообразность рециклинга отходов кремниевого производства – микрокремнезема (микросилики). При этом подробно рассматриваются способы утилизации микросилики различными методами. Показано, что при переработке микросилики образуются улучшенные композиционные материалы с уникальными функциональными свойствами. Авторы данной статьи предлагают получать из отходов кремниевого производства – микросилики – новые коррозионностойкие полимерные покрытия для металлических и неметаллических изделий. В данном случае микросилика будет использоваться как наполнитель при создании полимерного покрытия. Такое технологическое решение позволит снизить себестоимость продукции, сэкономить металлоресурсы и защитить их от воздействия агрессивных сред, расширить сырьевую базу, снизить экологическую нагрузку региона.

Ключевые слова: микросилика, виды микросилики, применение микросилики, отходы производства, композиционные материалы, добавки.

Введение

Кремний – один из важнейших компонентов, применяемый в различных отраслях промышленности для производства материалов. Однако, получение кремния электротермическим способом приводит к получению пылевидных отходов, содержащие кремний. Одним из таких отходов является микрокремнезем (микросилика), получаемый под воздействием высокой температуры в электродуговых печах. С повышением температуры частицы кремния испаряются вместе с сопутствующими газами по газоходу. Далее, проходя по газоходу, где происходит уменьшение температуры, газообразные частицы кремния трансформируются в следующее агрегатное состояние – жидкое, а после в твердое, образуя конденсированный темно-серый порошок с содержанием диоксида кремния [1].

Микрокремнезем может поставляться в разных формах [2, 3]. Микрокремнезем неуплотненный – плотность такого материала в среднем не превышает 350 кг/м³. Как правило, это мелкий порошок с крайне малым удельным весом, предназначенный для использования при производстве строительных цементных растворов и сухих фасованных смесей.

Микрокремнезем уплотненный с плотностью в среднем до 600 кг/м³ подвергается специальной обработке. Консистенция материала не является пылеобразной в отличие от неуплотненного микрокремнезема. Мелкие гранулы уплотнённого микрокремнезема обеспечивают дополнительную простоту и удобство при использовании таких добавок [2, 3].

Микрокремнезем гранулированный – плотность этого материала в среднем не превышает 1000 кг/м³. Обработка гранулированного микрокремнезема предусматривает добавление ограниченного количества водной среды, что способствует образованию твердого агломерата. Применение гранулированного микрокремнезема обусловлено совместным измельчением с частицами какого-либо другого вещества вплоть до образования одноконсистентной смеси [2].

Известно, что на заводах по производству кремния образуется большое количество твердых техногенных отходов, состоящих в основном из диоксида кремния, углерода и соединений фтора, натрия и серы; кроме того, присутствуют газообразные выбросы в атмосферу (тонкодисперсная пыль, фтористый водород, диоксид серы, смолистые). И если выбросы в атмосферу можно кардинально

Раздел 1. «Металлургия»

понизить, применяя более совершенные системы газоочистки, то для твердых отходов требуется разработка решений, обеспечивающих их утилизацию с получением легко реализуемых продуктов [2].

Образование промышленных отходов, их хранение негативно сказываются на качестве почвы. В ней накапливается избыточное количество губительно действующих на живые организмы соединений, в том числе канцерогенных. В результате этого в загрязненной «больной» почве идут процессы деградации, нарушается жизнедеятельность почвенных организмов, почва беднеет и теряет свои основные качества [2].

Главная задача перед человеком – это утилизировать отходы без вреда для окружающей среды, либо использовать их как вторичное сырье, создавая новые композиционные материалы. Человечество придумывает различные виды переработки отходов, сохраняя первозданными виды природы, но и также использование их на благо. С каждым годом таких технологических ресурсосберегающих идей становится все больше.

Авторы статьи предлагают использовать отходы кремниевого производства в качестве сырья или исходного материала для получения новых композиционных материалов с требуемым комплексом свойств для различных отраслей науки и техники.

Применение микросилики (микрокремнезем). В работе [4] рассматривается история применения микрокремнезема. Отправной точкой исследований микрокремнезема считается 1944 год, когда ученые Норвегии (Университет технических и естественных наук) начали заниматься изучением микрокремнезема в качестве добавки в строительные материалы. В 1950 году в городе Кристиансанн на заводе Fiskaа (Норвегия) установили первые экспериментальные фильтры для улавливания микросилики. В 1952 году проводились первые испытания микрокремнезема в качестве добавки в портландцементные бетоны. В 1974 году на этом же заводе инженеры кардинально перепроектировали промышленный рукавный фильтр [5].

В 1990 году мировое сообщество признало микрокремнезем как добавку для бетонов, обеспечивающую улучшенные свойства конечного продукта. В Казахстане пока данная технология не используется, так как нет законодательной базы, поэтому микрокремнезем покупают и используют компании других стран.

Использование микросилики позволяет улучшить такие качества материалов как прочность, коррозионную стойкость, морозостойкость, а также устойчивость к агрессивному воздействию химических веществ. Также добавление микросилики в качестве добавки позволяет экономить основной материал [3].

В работе [6] приведены сравнительные результаты повышения прочности бетона в результате добавления нанокремнезема и микрокремнезема. В ходе определения прочности бетона состава цемент–песок–вода с добавками нано- и микрокремнезема на сжатие и изгиб результаты показали, что наблюдается более высокая активность нанокремнезема в форме золя по сравнению с микрокремнеземом. Использование в виде золя нанокремнезема в количестве SiO_2 0,01-0,1 мас.% относительно расхода цемента дает точно такой же эффект, как при использовании SiO_2 5,0-10,0 мас.% в виде порошка микрокремнезема. Нанокремнезем позволяет снижать дозировку до 50 раз и повышает эффективность по сравнению с микрокремнеземом при сопоставимых значениях роста прочности при сжатии и изгибе. Также результаты эксперимента показали, что вместе с повышением прочности, повышаются такие характеристики как сульфатостойкость, морозостойкость, стойкость к миграции хлоридов и др.

В работе [7] предлагается использование отходов кремниевого производства в качестве добавки для улучшения технологических свойств тампонажного раствора. В качестве кремниевого отхода использовался микрокремнезем марок МК-65 и МК-85 в растворах с установленной температурой 22°C. Микрокремнезем марок МК-65 и МК-85 имеет следующие воздействия на тампонажный раствор: снижение плотности, водоотделения и фильтрации. Результаты показали, что данный микрокремнезем улучшил технологические характеристики тампонажного раствора, не превышая норму плотности, водоотделения и фильтрации. Также микрокремнезем марок МК-65 и МК-85 повышает прочностные характеристики цементного камня. Исследование подтвердило, что использование данного микрокремнезема в тампонажных растворах положительно влияет на его технологические показатели.

В работе [8] рассматривается применение ресурсоэффективной системы промышленных отходов и вторичного сырья в качестве добавки в строительные материалы и изделия. В качестве добавки к цементному камню, а также тяжелому бетону, был использован микрокремнезем ферросплавного

Раздел 1. «Металлургия»

производства. Цель работы заключалась в улучшении ряда эксплуатационных характеристик и свойств бетона при помощи активации микрокремнезема. В ходе эксперимента было установлено влияние активированного микрокремнезема на свойства тяжелого бетона, уменьшение содержания цемента, заменяя его микродисперсным наполнителем. Модифицирование добавкой «MasterGlenium 115» и микрокремнеземом марки МКУ-95 улучшаются физико-химические свойства, а также гидрофизические (водопоглощение, водонепроницаемость, морозостойкость). Данные добавки показали себя как достойные материалы для производства строительных изделий и материалов.

В работе [9] предлагается использование отходов кремниевого производства повторно в качестве шихты как дополнение к основному сырью. По данным АО «Кремний» пыль содержит диоксид кремния в среднем 86%, такое содержание химического элемента пагубно влияет на людей и окружающую среду. Целесообразное использование кремниевого отхода как добавку к основному сырью путем окомкования поможет не только утилизировать данный вид отходов, но и увеличить выход готового продукта, улучшить качество труда, причиняя меньшего вреда окружающей среде.

Применение микро- и наносилики в качестве добавки для бетонных и строительных изделий описано в работе [4]. В исследовании проведен обоснованный выбор подходящей добавки для улучшения характеристики бетона. В качестве модифицирующей добавки был выбран микрокремнезем. Данный материал вводили параллельно в сочетании с нафталиновым суперфиксатором «Пластификатор С-3» в бетонную смесь. Данные добавки привели к улучшению таких характеристик цемента, как увеличение прочности, морозо-, износо-, сульфостойкости, химической стойкости, проницаемости при пониженном расходе продукта. Также анализ рыночной стоимости добавок показал, что одним из достоинств использования микрокремнезема – это невысокая стоимость материала, что приводит к понижению себестоимости конечного продукта.

В работе [10] с целью повышения прочностных характеристик и сульфатостойкости бетонов предлагается метод использования микросилики. Для получения высокосульфатного бетона на основе портландцемента класса СЕМ II/B-P 32,5N применялись химические и высокодисперсные добавки. Одной из добавок является микрокремнезем. Модификация портландцемента с микрокремнеземом и платифицирующей добавкой RHEOVUILD 1000T улучшило ряд характеристик цементного камня. При добавлении микросилики с суперфиксатором повысилась прочность образцов, выдержанных в сульфатном растворе, что говорит о повышении сульфатостойкости. Результаты исследования показали, что микросилика положительно влияет на материалы, которые используются в таких агрессивных средах.

В работе [11] показана возможность получения легковесовой керамики из органоминеральных отходов, включающих в себя высококальциевую золу-унос и микрокремнезема. Для получения легковесовой керамики использовалась смесь из микрокремнезема с добавками глиеже вместе с водным раствором хлористых солей. Сочетание микрокремнезема с добавкой жидкого стекла дает возможность пластического формирования и получения пористого материала. Результат исследования показал, что использование микрокремнезема как сырья в качестве шихты помогает устранить воздушную усадку, активизировать минералообразование, а также снизить температуру обжига за счет внутренних парогазовых фаз.

В работе [12] изучается вопрос получения кислотостойких и теплоизоляционных материалов на основе микрокремнезема. В ходе исследования микрокремнезем использовался как сырье для шихты. Использовались двухкомпонентная (микрокремнезем и жидкое стекло) и трёхкомпонентная (микрокремнезем, зола-унос и жидкое стекло) шихты, обожженные при температурах 650 и 850°C, соответственно. В ходе эксперимента был принят способ водозатворения смеси из микрокремнезема и ввод выгорающей добавки. Далее был получен керамический материал полусухого прессования на основе микрокремнезема. Анализ материала показал удовлетворяющий уровень кислотостойкости, прочности и теплоизоляции.

В работе [13] исследовано влияние добавок микрокремнезема и смеси шлак-кремнезем в составе обжиговых керамических масс. В ходе эксперимента были произведены сушка сырья, формирование образцов и увлажнение смеси. Далее образцы подвергались испытаниям на прочность и водопоглощение. Результаты показали, что введение в состав керамических материалов микрокремнезема способствует снижению водопоглощения. Обжиг керамических образцов при 1100-12000°C способствует увеличению сопротивления образцов на разрушение при сжатии.

В работе [14] предлагается использовать для металлургических агрегатов комбинированные

Раздел 1. «Металлургия»

огнеупорные материалы с добавками техногенных отходов. В исследовании используется кремнеземистый огнеупор, полученный из глины, шамота с добавкой отходов кремниевого производства, а именно микросилики, также используются добавки отходов фтористого алюминия – кремнегеля. Образцами служили прямоугольные кубы из смеси кварца, микросилики, кремнегеля, глины и шамоты, далее спрессованные и высушенные в электрической воздушной печи с выдержкой в течение 24 ч. Результаты показали, что, заменяя кварц микросиликой, – пористость материала снижается, а насыпная плотность образцов повышается. Замена обычного источника кремния в тугоплавком образце на активный приводит к уменьшению пространства между частицами, что говорит о лучшей уплотняемости при спекании. Предел прочности при сжатии увеличился от 10 до 30%, однако микросилика оказала небольшое влияние на увлечение теплопроводности.

В работе [15] авторы предлагают использовать микрокремнезем в качестве добавки для повышения физико-механических свойства портландцемента. Количество добавки микрокремнезема составляет от 2 до 8%. Пробы цементов получали смешиванием портландцемента с добавкой микрокремнезема, взятого в определенном количестве, в металлическом барабане в течение 5 минут. Результаты исследования показали, что удельная поверхность возрастает с увеличением содержания микрокремнезема, водопотребность увеличивается, тем самым отразившись на увеличении сроков схватывания смеси, а также увеличилась прочность цементного камня.

В работе [16] предлагается использовать раствор из микрокремнезема в качестве покрытия для повышения стойкости к истиранию и устойчивости к царапинам. В состав покрытия включается жидкий растворитель (вода или органический растворитель), смола и до 25% микрокремнезема. При нанесении покрытия поверхность приобретает блеск, что позволяет в будущем улучшить растекаемость краски.

В работе [17] предлагается использовать микрокремнезем в качестве армирующего наполнителя для систем полимочевины. Микрокремнезем помогает заполнить пустые объемы материала, тем самым уменьшая его пористость. Покрытия из полимочевины, модифицированные микрокремнеземом и аэросилом, готовили с помощью напылительной машины. Физико-химические свойства полученных композиций измеряли после старения образцов в различных условиях: хранение при комнатной температуре, выдержка в течении 5 и 14 суток при 80°C, выветривание в течение 500 часов с ультрафиолетовым облучением. Результаты эксперимента показали, что с добавлением микрокремнезема и аэросила повышаются такие механические параметры полимочевинных композиций, как относительное удлинение при разрыве, прочность при растяжении и твердость. После проведения термического анализа было выявлено, что добавление модификаторов значительно улучшает термостабильность. Также эксперимент позволил доказать авторам, что добавление кремнеземных наполнителей образуют агломераты в композициях полимочевины, а добавление парафина улучшает дисперсность наполнителя.

Таким образом, из всего разнообразия разработок по переработке отхода кремниевого производства – микросилики можно выделить следующие характерные признаки:

- при вторичной переработке микросилики происходит утилизация производственных отходов кремниевого производства (пыльной фракции микросилики) и возвращение некоторых ценных компонентов в производственные циклы;
- микросилика является надежной, доступной и экономически выгодной альтернативой для улучшения свойств имеющихся в настоящее время материалов и получения новых материалов со специальными свойствами.
- существующие технологии утилизации кремнийсодержащих порошкообразных отходов, несмотря на их разнообразие, имеет один общий основной признак – в результате их переработки кремний в них как был, так и остался кремнием, то есть он не изменяет своего химического состояния.

Выводы

Основные причины неблагоприятной экологической ситуации, связанной с хранением, размещением, накоплением отходов производства и потребления: нехватка мест захоронения отходов, соответствующих экологическим нормам; отсутствие нормативной базы; отсутствие технологий и/или финансирования новейших способов переработки и утилизации отходов производства и потребления; слабо развита перерабатывающая промышленность; слабый контроль над образованием отходов;

Раздел 1. «Металлургия»

недостаточное экологическое образование населения.

Но очевидно, что отходы производств, попутных и вторичных продуктов – это огромный резерв повышения эффективности национальной экономики. Широкое применение отходов производства и потребления положительно скажется как на развитии промышленности, малого и среднего бизнеса, так и на ресурсном потенциале и состоянии окружающей среды. Особое внимание необходимо уделить масштабам и степени загрязнения территорий отходами производства и потребления, их вредное влияние на состояние окружающей среды и здоровье населения.

Развитие сферы утилизации и переработки отходов является одной из основных экономических задач, ответ на которую даст толчок к изменению взгляда на отходы производства как на конечный продукт использования; увеличению охвата использования методов вторичной переработки и концентрации внимания на получение из него экономической прибыли.

Литература

1 Сайт <https://mk85.ru/mk-neplotnenn/>. [Электронный ресурс]. Микрокремнезем МК-85 неуплотненный конденсированный. (дата обращения 15.06.2023 г.).

2 Сайт <https://msd.com.ua/tehnologiya-teploizolyacii/problema-promyshlennyx-otxodov/>. [Электронный ресурс]. Технология. Теплоизоляция. Проблемы промышленных отходов. (дата обращения 15.06.2023 г.).

3 Сайт <https://mk-mineral.ru/articles/primenenie-mikrokremnezema/primenenie-mikrokremnezema/>. [Электронный ресурс]. Применение микрокремнезема. (дата обращения 16.06.2023 г.).

4 Мункхтувшин Д., Балабанов В.Б., Пуценко К.Н. Опыт применения добавок микро- и наносилики из отходов кремниевого производства в бетонных технологиях // Известия вузов. Технические науки. Строительство, Том 7, №3, 2017. – с. 107-114.

5 Rohde D., Beck A., Wilpert P., Windfeldt M.K., Andersson L.E. Thermal energy storage for increased waste heat recovery at a silicon production plant in Norway. Applied Thermal Engineering. – 2022. – 215. – №118909.

6 Потапов В.В., Горев Д.С. Сравнительные результаты повышения прочности бетона вводом нанокремнезема и микрокремнезема // Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН. Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 9. – с. 98-102.

7 Буглов Н.А. и др. Использование отходов кремниевого производства в качестве добавок, улучшающих технологические показатели тампонажных растворов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 6. – с. 122-130.

8 Ткач Е.В., Темирканов Р.И., Ткач С.А. Комплексное исследование модифицированного бетона на основе активированного микрокремнезема совместно с микроармирующим волокном для повышения эксплуатационных характеристик // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 5. – с. 215-226.

9 Леонова М.С. Окомкование пылевых отходов шламохранилищ кремниевого производства как способ снижения экологических рисков. XXI век // Техносферная безопасность. – 2019. – №4(2). – с. 142-149.

10 Садыхова А.Р. Пути повышения прочности и сульфатостойкости бетонов // Азербайджанский Архитектурно-Строительный Университет. Инновации и инвестиции. – 2018. – №1. – с. 223-225.

11 Лохова Н.А., Косых А.В., Тугарина А.О. Рациональное использование отходов промышленности в производстве легковесной керамики // Братский государственный технический университет. Успехи современного естествознания. – 2003. – №11. – с. 19-22.

12 Макарова И.А., Либеровская С.В. Кислотостойкие и теплоизоляционные керамические материалы на основе микрокремнезема // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2019. – №9(4). – с. 742-753.

13 Юшков В.П., Торосян В.Ф. Обжиговые керамические композиты с металлургическими шлаками // Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета. Сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность». – Т. 2. – 2015. – с. 385-388.

14 В.Ю. Бажин, М.В. Глазьев Комбинированные огнеупорные материалы с добавкой техногенных отходов для металлургических агрегатов // ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».

Раздел 1. «Металлургия»

Новые огнеупоры. – 2020. – №11. – с. 21-26.

15 Потапова Д. А., Капустин Ф. Л. Исследование влияния добавки микрокремнезема на физико-механические свойства портландцемента // Уральский федеральный университет.

16 Салькеева Л.К., Севостьянова К.А., Каколина Г.М., Тажбаев Е.М., Сугралина Л.М., Омашева А.В., Каколина Г.М. Патент С01В 33/18 «Способ получения осажденного кремнеземного наполнителя». Бюл. №15. Опубликовано 15.11.2016.

17 Meskhi B., Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Chernil'nik A., El'shaeva D. Insulation Foam Concrete Nanomodified with Microsilica and Reinforced with Polypropylene Fiber for the Improvement of Characteristics. *Polymers*. – 2022. – 14(20). – №4401.

Г.А. Ульева, Е.М. Мацугина

Кремний өндірісінің қалдықтарынан қайталама материалдарды алу

Бұл мақала шолу болып табылады. Авторлар кремний өндірісінің қалдықтарын – микро кремний диоксиді (микросиликтер) қайта өңдеудің орындылығын келтіреді. Бұл микросиликаны әртүрлі әдістермен жою әдістерін егжей-тегжейлі қарастырады. Микросиликаны қайта өңдеу кезінде ерекше функционалды қасиеттері бар жақсартылған композициялық материалдар пайда болатындығы көрсетілген. Осы мақаланың авторлары кремний өндірісінің қалдықтарынан - микросиликтерден-металл және металл емес өнімдерге арналған коррозияға төзімді жаңа полимерлі жабындарды алуды ұсынады. Бұл жағдайда микросилика полимерлі жабынды жасау кезінде толтырғыш ретінде пайдаланылады. Мұндай технологиялық шешім өнімнің өзіндік құнын төмендетуге, металл ресурстарын үнемдеуге және оларды агрессивті ортаның әсерінен қорғауға, шикізат базасын кеңейтуге, аймақтың экологиялық жүктемесін азайтуға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: микрокремний тотығы, микрокремнийдің түрлері, микрокремний тотығын пайдалану, өндіріс қалдықтары, композиттік материалдар, қоспалар.

G.A. Ulyeva, E.M. Matsugina

Obtaining secondary materials from silicon production wastes

This article is a review article. The authors present the feasibility of recycling of silicon production waste - microsilica (microsilica). The methods of microsilica recycling by different methods are discussed in detail. It is shown that recycling of microsilica produces improved composite materials with unique functional properties. The authors of this paper propose to obtain new corrosion-resistant polymer coatings for metallic and non-metallic products from silicon production waste - microsilica. In this case, microsilica will be used as a filler in the creation of polymer coating. This technological solution will allow to reduce the cost of production, save metal resources and protect them from the impact of aggressive environments, expand the raw material base, and reduce the environmental load of the region.

Key words: microsilica, types of microsilica, applications of microsilica, production waste, composite materials, additives.

References

1 Website <https://mk85.ru/mk-neplotnenn/>. [Electronic resource]. Microsilica MK-85 unconsolidated condensed silica. (circulation date 15.06.2023).

2 Website <https://msd.com.ua/tehnologiya-teploizolyacii/problema-promyshlennyx-otxodov/>. [Electronic resource]. Technology. Thermal insulation. Problems of industrial waste. (accession date 15.06.2023).

Раздел 1. «Металлургия»

3 Website <https://mk-mineral.ru/articles/primenenie-mikrokremnezema/primenenie-mikrokremnezema/>. [Electronic resource]. Microsilica application. (accessed 16.06.2023).

4 Munkhtuvshin D., Balabanov V. B., Putsenko K. N. Experience of using additives of micro- and nanosilica from silicon production wastes in concrete technologies // *Izvestiya vuzov. Technical Sciences. Construction*, Vol. 7, No. 3, 2017. - с. 107-114.

5 Rohde D., Beck A., Wilpert P., Windfeldt M.K., Andersson L.E. Thermal energy storage for increased waste heat recovery at a silicon production plant in Norway. *Applied Thermal Engineering*. - 2022. - 215. - №118909.

6 Potapov V.V., Gorev D.S. Comparative results of increasing strength of concrete by introducing nanosilica and microsilica // *Research Geotechnological Center FEB RAS. Modern knowledge-intensive technologies*. - 2018. - № 9. - с. 98-102.

7 Buglov N.A. et al. Use of Silicon Production Waste as Additives Improving Technological Performance of Plugging Solutions // *Izvestia of Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. - 2022. - Т. 333. - № 6. - с. 122-130.

8 Tkach E.V., Temirkanov R.I., Tkach S.A. Integrated study of modified concrete based on activated microcementem together with micro reinforcing fibre to improve performance characteristics // *Izvestia of Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. - 2021. - Т. 332. - № 5. - с. 215-226.

9 Leonova M.S. Pelletizing of dust wastes from silicon production sludge pits as a way to reduce environmental risks. *XXI century // Technosphere safety*. - 2019. - №4(2). - с. 142-149.

10 Sadikhova A.R. Ways to improve strength and sulphate resistance of concrete // *Azerbaijan Architecture and Construction University. Innovations and investments*. - 2018. - №1. - с. 223-225.

11 Lokhova N.A., Kosykh A.V., Tugarina A.O. Rational use of industrial waste in the production of lightweight ceramics // *Bratsk State Technical University. Uspekhi sovremennogo naturakhnaistva*. - 2003. - №11. - с. 19-22.

12 Makarova I.A., Liberovskaya S.V. Acid-resistant and heat-insulating ceramic materials based on microsilica // *Izvestiya vuzov. Invest. Construction. Real Estate*. - 2019. - №9(4). - с. 742-753.

13 Yushkov V.P., Torosyan V.F. Fired ceramic composites with metallurgical slags // *Yurginsky Technological Institute (branch) of Tomsk Polytechnic University. Proceedings of V All-Russian Scientific and Practical Conference "Nondestructive Testing: Electronic Instrumentation, Technology, Safety"*. - Т. 2. - 2015. - с. 385-388.

14 V.Yu. Bazhin, M.V. Glazyev Combined refractory materials with an additive of man-made waste for metallurgical units // *FGBOU VPO "Saint-Petersburg Mining University. New refractories*. - 2020. - №11. - с. 21-26.

15 Potapova D.A., Kapustin F.L. Study of the effect of microsilica additive on physical and mechanical properties of Portland cement // *Urals Federal University*.

16 Salkeyeva L.K., Sevostyanova K.A., Kakolina G.M., Tazhbaev E.M., Sugralina L.M., Omasheva A.V., Kakolina G.M. Patent C01B 33/18 "Method of preparation of precipitated silica aggregate". Bulletin number 15. Published on 15.11.2016.

17 Meskhi B., Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Chernil'nik A., El'shaeva D. Insulation Foam Concrete Nanomodified with Microsilica and Reinforced with Polypropylene Fiber for the Improvement of Characteristics. *Polymers*. - 2022. - 14(20). - №4401.