

В.А. Неведомский, к.т.н.
ООО «ТехноСКАРМ», м. Нікополь

А.В. Чернышов, ст. преп.

Днепропетровский государственный технический университет

А.А. Чернышов, инж. 1-й кат.

ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат»

Нанотехнология получения каменного материала из огненно-жидких техногенных отходов для получения изделий

В статье представлена нанотехнология перевода огненно-жидких техногенных отходов в каменный материал и изготовление из него различных изделий и конструкций. Исследована кристаллизация расплава при температурах максимального выделения пироксена – 1000–900 °С., длительность кристаллизации и его зависимости от габаритов, толщины отливок с целью исключения последующей механической обработки изготовленных изделий.

Приведены результаты экспериментальных исследований по определению физико-механических и деформационных характеристик каменных материалов в зависимости от высоких температур в пределах 600–1000 °С. А также представлены результаты исследований по армированию изделий из каменного материала. На основании данных исследований разработана технология изготовления контейнеров для захоронения радиоактивных отходов, пестицидов и гербицидов, а также дорожных плит, фундаментных блоков, утяжелителей для труб нефтегазопроводов.

На основании использования данной нанотехнологии и проведенных исследований решается задача энергоресурсосбережения и экологической безопасности.

Ключевые слова: нанотехнология; каменный материал; кристаллизация; технология; контейнеры для радиоактивных отходов; техногенные отходы.

Введение. Разработка технологии черного, белого и цветного (сиграна) шлакоситаллов на основе гранулированных доменных шлаков - наиболее крупное достижение в области синтеза новых видов стеклокристаллических материалов с использованием вторичных производств, которые получили промышленное внедрение. Однако наиболее энергосберегающим видом технологии является применение кислых шлаков в виде высокотемпературного расплава непосредственно из металлургических печей и формование стеклокристаллических материалов методом литья, так как в каждой тонне огненно - жидкого шлака содержится около 1,6 x 10 кДж тепловой энергии [1, 2]. Такое производство целесообразно организовывать на металлургических заводах или в непосредственной близости к ним, что позволит сохранить физическую теплоту расплава, внедрить малоотходную энергосберегающую технологию, в 4–7 раз сократить производственные площади, значительно снизить себестоимость основной продукции и создать комплексные ресурсосберегающие технологии.

Анализ последних исследований и публикаций. Шлаки силикомарганца в нашей стране в основном перерабатываются путем водной грануляции в шлак и дорожный щебень. Только на Никопольском заводе ферросплавов было организовано промышленное производство стеклокристаллических изделий строительного и технического назначения методом литья из огненно-жидких шлаков [3]. По химическому составу силикомарганцевые шлаки Никопольского завода ферросплавов относятся к системе $R_2O - MgO - CaO - MnO - Al_2O_3 - SiO_2$.

Конечный шлак, поступающий из герметизированной рудно-термической печи по выплавке силикомарганца на формование изделий, представляет собой восстановленный расплав. Это обусловлено резко восстановительными условиями ведения всего технологического процесса.

Цель работы. Разработка и усовершенствование технологии получения стеклокристаллических материалов строительного и технического назначения из огненно-жидких шлаковых расплавов силикомарганца, а также изучить его кристаллизационные способности и механизм кристаллизации в зависимости от температуры поступающего расплава шлака и температуры формования изделий методом литья.

Изложение основного материала. Методами электронной и световой микроскопии установлено [1, 2, 4] следующее:

– снижение кристаллизационной способности расплава по мере уменьшения температуры его отбора из печи вследствие дифференциации расплава в предкристаллизационный период и прошедших начальных стадий кристаллизации;

– увеличение степени закристаллизованности материала с понижением температуры отбора расплава на формование;

– высокая кристаллизационная способность расплава силикомарганцевого шлака, обусловленная выделением сульфидов марганца, высоким содержанием 3d-переходных элементов (Mn, Fe) и широкой возможностью изоморфизма

Ca^{2+} - $\text{Mn}^{2+}(\text{Fe}^{2+})$, Mg^{2+} - $\text{Mn}^{2+}(\text{Fe}^{2+})$ при формировании пироксена $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Ca}, \text{Mn}^{2+}) \times (\text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ca}, \text{Mn}^{2+}) \times (\text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+}) \times [\text{Si}_2\text{O}_6]$.

Установленная закономерность влияния теплового прошлого расплава на процесс кристаллизации дает возможность корректировать режим охлаждения и кристаллизации расплава силикомарганцевого шлака в зависимости от подготовленности его к кристаллизации.

Схему процесса кристаллизации огненно-жидкого шлака можно представить следующим образом (рис. 1): 1500^oC – выделение сульфида марганца; 1400 – 1300^oC – фазовое разделение, вероятно, ликвационного характера; 1200-1000^oC – начало кристаллизации с выделением пироксена, плагиоклаза; 1000 – 950^oC – интенсивное пироксенообразование [2-4].

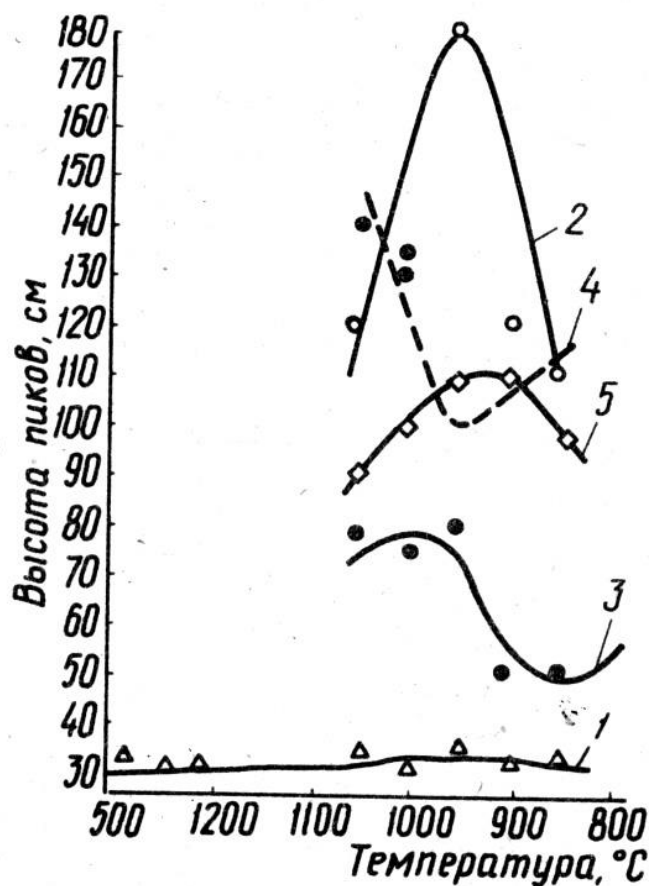


Рис. 1. Относительное содержание кристаллических фаз в процессе термообработки силикомарганцевого шлака

1 – бустамит; 2 – бустамит+тефроит; 3 и 4 – Mn-диоксид; 5 – плагиоклаз +Mn-диоксид;
3-4 – соответственно гранулированный и огненно-жидкий шлаки

Установленные структурно-фазовые превращения расплава шлака силикомарганца с понижением температуры позволили объяснить резкое нарастание вязкости в интервале 1420–1330^oC (рис. 2). Эта температурная область совпадает с началом фазового разделения в расплаве, увеличением жесткости кремнекислородного каркаса структуры, что затрудняет при температурах ниже 135^oC формование изделий сложной конфигурации из расплава вследствие большой скорости его затвердевания.

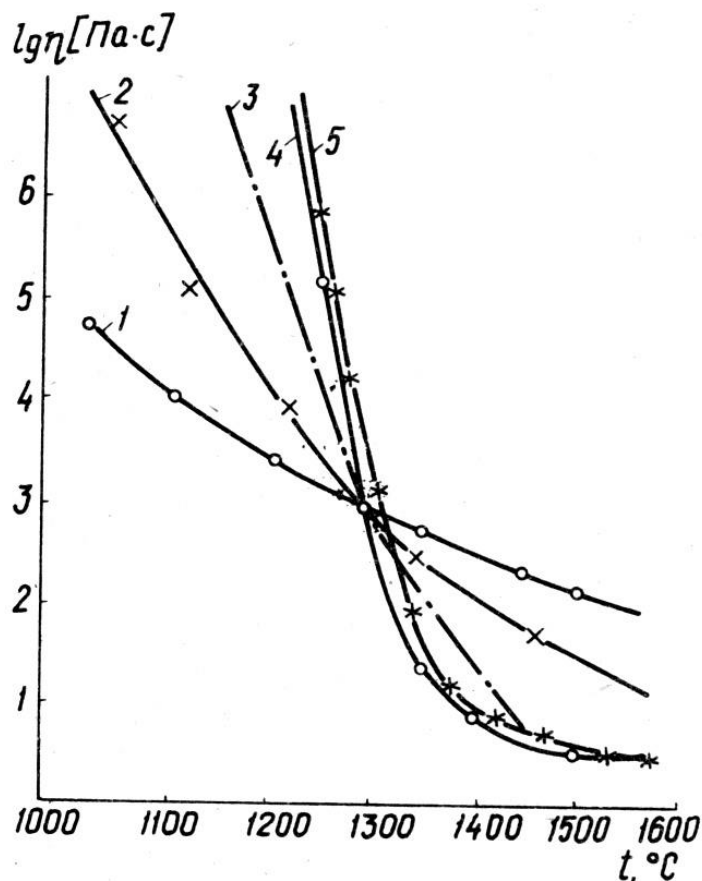


Рис. 2. Сравнительная температурная зависимость вязкости стекол и стеклокристаллических материалов
 1 – стекло; 2 – белый шлакоцисталл; 3 – каменное литве; 4 – силікатний расплав;
 5 – силікомарганцевий шлак НЗФ

Установленные закономерности кристаллизации расплава силікомарганцевого шлака послужили основой разработки рациональных режимов формования изделий и последующей кристаллизации. В настоящее время в цехе шлакового литья Никопольского завода ферросплавов отработаны технологии получения материалов технологического и строительного назначения.

С пуском цеха (рис. 3) значительно расширен ассортимент продукции из стеклокристаллических материалов, полученных на основе огненно-жидких шлаков силікомарганца.

Свойства литья – СКАРМ (стеклокристаллический армированный материал) открывают широкие возможности для его использования в конструкциях различных агрегатов, работающих в условиях абразивного износа, агрессивной среды и высоких температур не только в качестве футеровочного, но и конструкционного материала. Имеется опыт внедрения и перспективные разработки использования СКАРМ литья в шихтовых бункерах, циклонах, томильных колодцах, газоходах ТЭЦ, вагонетках туннельных печей, дымовых трубах и др. [1–4].



Рис. 3. Наружный и внутренний виды цеха шлакового литья Никопольского завода ферросплавов

Для расчета и проектирования конструкций, в том числе комплексных, с применением СКАРМ литья необходимо знать физико-механические и деформационные характеристики этого материала и характер их изменения при воздействии высоких температур. Исследования по изучению этих свойств до настоящего времени не проводили.

Проведены экспериментальные исследования кубиковой и призмной прочности, модуля упругости и деформативности СКАРМ (при нормальной и высоких температурах литья). Испытывали опытные образцы-кубы размерами 50x50x50 и 70x70x70 мм и призмы размерами 50x50x250 и 70x70x300 мм. Образцы были отлиты на специализированном участке литья НЗФ и прошли предварительную обработку (обрезку, распиловку и т.д.). Часть призм была снабжена специальными металлическими трубками, установленными в форму до заливки шлакового расплава для установки выносных экстензометров при исследовании деформативности под нагрузкой при высоких температурах. Деформации измеряли индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм, вынесенными при помощи нихромовых тяг за пределы нагревательной печи. Продольные и поперечные деформации призм под нагрузкой при нормальной температуре измеряли тензорезисторами с базой 50 мм с фиксированием величин деформаций цифровым тензометрическим мостом ЦТМ-5. Испытания образцов были выполнены по стандартным методикам. Характеристики литья определяли при нормальной температуре, в горячем состоянии при нагреве до 773 К и 1073 К, а также в охлажденном состоянии после нагрева до этих температур.

Данные испытаний свидетельствуют о том, что СКАРМ литье имеет высокие прочностные характеристики, в 8–10 раз превышающие при нормальной температуре прочность наиболее часто употребляемых сейчас бетонов (прочностью 30–40 МПа). Это важное качество литья еще нигде целенаправленно не использовано в конструкциях.

Модуль упругости литья при нормальных температурах в 2–2,5 раза больше модуля упругости тяжелых высокопрочных бетонов, и значения его практически постоянны до нагрузок, равных 90–95 % разрушающих. Модуль упругости при нормальной температуре в случае нагрева до 773 К имеет практически одинаковые значения. Нагрев до 1073 К существенно (более чем на 40%) снижает модуль упругости литья.

Температурные деформации при нагревании до 1073 К измеряли в процессе первого и второго нагрева. Получены значения коэффициента линейного расширения литья для диапазона температур, в котором представляется возможным его применение в качестве конструкционного материала.

Проведенные испытания позволили получить данные о физико-механических и деформативных характеристиках литья в диапазоне температур до 1073 К, необходимые для применения его в различных конструкциях, в том числе комплексных, работающих в условиях абразивного воздействия, агрессивной среды и высоких температур.

В процессе изготовления СКАРМ-плит металлическая арматура подвергается длительному воздействию высокой температуры. Существенное влияние на арматуру оказывают электрохимические реакции, происходящие на границе металл - шлаковый расплав. Для количественной и качественной оценки влияния указанных факторов на физико-механические характеристики арматурной стали, проведены экспериментальные исследования арматуры разных классов и диаметров. Испытаниям подвергались стержни длиной 850 мм из арматуры класса АI диаметром 12, 18 мм, класса АII диаметром 16, 32 мм, класса АIII диаметром 8, 12, 16, 32 мм. [4].

Стержни к испытаниям подготовили по принятой на заводе технологии изготовления шлаколитых изделий: на специальных поддонах их подавали в печь, нагревали при температуре 500°C и заливали огненно-жидким шлаком температурой 1380°C. После кристаллизации и отжига в течение 14 часов до 50°C стержни извлекали из печи, освобождали от слоя литья и окалина, измеряли по стандартной методике фактический диаметр и определяли потери металла за счет окалины. Арматурные стержни после отжига уменьшались в диаметре на 1–2 мм. Механические испытания проводили на разрывной машине ГРМ-50. Временное сопротивление арматурной стали испытанных классов, снижается на 12–20 %, модуль упругости – на 15–20 %, что идентично диаграмме растяжения термически упроченной стали. Относительное удлинение арматурной стали, прошедшей технологию шлакового литья, уменьшилось на 15–20 %.

Микроструктуру арматурной стали исследовали на металлографическом микроскопе отраженного света «Неорhot-21». Для определения величины зерна микрошлифы стержней подвергали травлению 4 % кислотой HNO₃. Рост зерна у стали, прошедшей отжиг в силикатном расплаве, обусловил снижение ее прочности.

Таким образом, для армирования плоских изделий из СКАРМ литья ферросплавного завода можно применять арматуру из стали классов А-I, А-II, А-III. Модуль упругости и прочности на растяжение арматурной стали этих классов в шлаколитых изделиях снижается на 12–14 %. В расчетах необходимо применять коэффициенты условий работы, рекомендуемые для термически упроченной стали. Для снижения влияния перегрева на оплавление граничных слоев металла, проникновение к ним кислорода и

образование оксидных оболочек, необходимо ослабить процессы электрохимической коррозии стали, применением защитных покрытий [3–4].

Для радикального, безопасного и экономичного решения проблемы утилизации и захоронения радиоактивных отходов (РАО) требуется большое количество специальных средств, а именно контейнеров универсального типа. Контейнеры для радиоактивных отходов являются одним из элементов обеспечения радиационной безопасности на основных стадиях обращения с отходами, начиная от сбора и хранения необработанных отходов и заканчивая захоронением кондиционированных РАО (рис. 4).

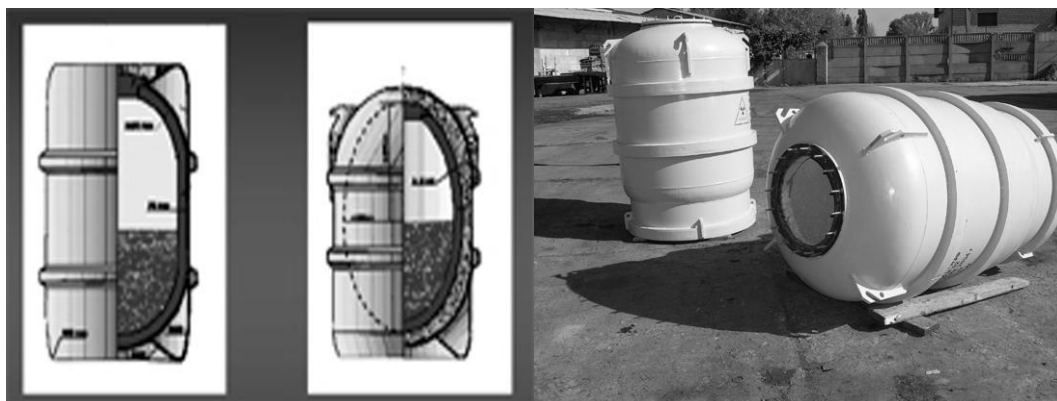


Рис. 4. Контейнер по СКАРМ-технологии (объем – 2,0м³)

Рассмотрено [5] достаточно большое количество конструкций контейнеров, которые имеют различные формы, их корпуса изготавливают из чугуна, каменного литья, углеродистой, нержавеющей стали, бетона, композитных полимеров и других защитных материалов. Структурно, в большинстве случаев, корпус контейнеров выполняется в виде наружной и внутренней оболочек из различных материалов, причем наружная оболочка при аварийных ситуациях предохраняет защитный материал от разрушения.

Многообразие типов контейнеров определяется различным функциональным их назначением, наличием широкого спектра радиоактивных отходов, условиями сбора, транспортировки, хранения, переработки и захоронения РАО.

С учетом специфики задачи и разнообразных требований, при конструировании или выборе контейнеров учитываются следующие основные признаки:

- функциональный - по техническому назначению контейнеров: для сбора, транспортировки, хранения, захоронения (для разнообразных производителей и приемщиков РАО);
- по защитным свойствам - для определенного типа отходов;
- унификации – по весу, габаритным характеристикам, применяемым материалам. При этом важным элементом унификации контейнеров большого объема является использование в качестве стандартного типоразмера 200 л бочки, которая широко используется на различных стадиях обращения с отходами. Для изготовления контейнеров для РАО (радиоактивные отходы) используется целый ряд конструкционных материалов, характеристики которых приведены в таблице 1.

Производственно-коммерческой фирмой ПКФ «Пифагор», совместно со специалистами Никопольского завода ферросплавов ПАО НЗФ) предложено изготавливать рабочую емкость контейнера (находящуюся в длительном непосредственном контакте с химически активными, ядовитыми или радиоактивными веществами) в виде монолитной оболочки (капсулы) из армированного стеклокристаллического материала (сокращенно СКАРМ), сырьем для которого являются огненно-жидкие шлаки ферросплавного производства [6–11]. При оптимальном армировании (5–7 % общего веса) и определенной технологии получают предварительно напряженные монолитные оболочки, прочность которых в 8–10 раз превышает прочность изделий из наиболее часто употребляемого бетона. Это важнейшее свойство СКАРМ литья впервые целенаправленно используется в конструкции контейнера.

Известны результаты многих экспериментальных исследований, показывающие, что камнелитые материалы пироксенового состава, к которым непосредственно и относятся огненно-жидкие шлаки НЗФ, отличаются высокой плотностью, низкой пористостью, которая имеет к тому же замкнутый характер. Это свойство обеспечивает полное отсутствие водопоглощения, высокую газоплотность, устойчивость к истиранию и стойкость к агрессивным кислотно-щелочным средам при комнатной и повышенной температуры при кратковременном и длительном воздействиях. При выдержке образцов в растворах кислот и щелочей в течение 6 мес. при температуре 25 °С потери их массы не превышали 0,3–0,9 %. При

этом коррозия наблюдается лишь в первом месяце испытаний, затем она снижается и, начиная со второго месяца, практически не изменялась. Сопоставительные данные испытаний огненно-жидких шлаков НЗФ и других распространенных видов каменного литья приведены в [1–4, 6–11].

Таблица 1

Физико-механические характеристики материалов

Характеристика материала	СКАРМ	Каменное литье	Шлакоситалы	
1	2	3	4	
Плотность кг/м ³	2900–3100	2900–3050	2600–2800	
Предел прочности, МПа: при сжатии при изгибе	450–600	250–400	500–600	
	150–190	30–50	80–130	
Истираемость, кг/м ²	0,20–0,40	0,20–0,80	0,15–0,25	
Модуль упругости, 10 ³ МПа	93–98	93–110	90–120	
Ударная вязкость, кДж/м	2,0–3,0	1,2–3,0	4,4–5,9	
Микротвердость, МПа	8500–11000	7500–8900	11000–12400	
Температурный коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁷ /°С	60–84	62–100	65–85	
Температура начала размягчения, °С	1190	1050	950	
Термостойкость, °С	770–900	250–800	200–500	
Теплопроводность, Вт/м·°С	1,2–1,37	1,14–1,48	1,16–1,63	
Удельная теплоемкость, Кдж/кг·°С	0,83–1,02	0,81–1,25	0,71–0,84	
Химическая стойкость %:				
	96 %-й H ₂ SO ₄	97,8–99,9	99,3–99,8	99,5–99,8
	20 %-й HCl	97,0–98,5	96,6–99,5	98,0–99,8
35 %-й KOH/NaOH	78,0–86,2	82,0–92,0	74,4–90,0	
Водопоглощение, %	0–0,1	0,05–0,22	0	

В Институте проблем литья АН УССР еще в 1989-1990 г. были проведены комплексные исследования радиационной устойчивости камнелитых материалов, которые производились в Украине. И они подтвердили высокие эксплуатационные и физико-химические свойства этих материалов, которые могут быть использованы для производства специальных РАО- и ТО-контейнеров. Сопоставительные испытания образцов каменного литья на основе базальтовых пород (предприятие «Укрметаллургремонт» г. Кривой Рог) и шлакового (Никопольский завод ферросплавов) показали, что большей искусственной радиоактивностью обладают материалы на основе базальта, огненно-жидкие шлаки активируются примерно в 100 раз меньше, что подтверждает целесообразность их применения в качестве универсальных защитных средств при изготовлении контейнеров, покрытий, стационарных емкостей-хранилищ [6–7].

СКАРМ-капсула из шлаков ферросплавного производства обеспечивает:

- абсолютную герметичность;
- высокую стойкость к воздействию химически агрессивных сред;
- хорошие энергопоглощающие показатели радиоактивного излучения;
- высокую прочность;
- относительно низкую себестоимость при серийном изготовлении вследствие дешевизны сырья, поступающего для литья СКАРМ-оболочки в расплавленном состоянии.

Но при массе достоинств нового контейнера у него есть и проблемные места. Основные недостатки СКАРМ-контейнера вытекают из сущности происхождения самого материала, его стеклокристаллической структуры и химического состава. К ним относятся:

- значительная стоимость механической обработки из-за высокой его твердости (обработка осуществляется только алмазным инструментом);
- относительно низкие показатели предела прочности на растяжение, что характерно для неармированного материала.

Однако, как показала практика опытного производства и выполненные исследования, при правильно выбранной форме изделия и управляемой кристаллизации расплава шлака последний недостаток технически вполне устраним.

Проектные и эксплуатационные характеристики разработанного контейнера нового типа значительно превосходят требования действующего ГОСТа №16327-88 «Комплекты упаковочные транспортные для радиоактивных веществ».

Важнейшим преимуществом СКАРМ-контейнера нового типа есть его исключительная стойкость к воздействию высоких температур (например, пожар при аварии транспортных средств,

террористическом акте, техногенных катастрофах и т. д.) которая основана на физических свойствах нового материала – почти нулевой теплопроводности. По этому, даже при оплавлении внешнего металлического корпуса, защитный сыпучий материал спекается, образуя вокруг капсулы «защитную корку», благодаря которой температура отходов внутри рабочей емкости не повышается и капсула сохраняет свою герметичность. По имеющимся данным такими свойствами не обладает ни один из известных в технической и патентной литературе контейнер.



Рис. 5 Нанесение СКАРМ-оболочки на контейнер

Наши исследования [11] показали высокую эффективность применения СКАРМ-капсул на всех технологических стадиях обращения с РАО. Так, например, после сбора и заполнения СКАРМ-капсула герметизируется и легко дезактивируется с применением растворов кислот и щелочей. Толстая армированная шлаколитая оболочка надежно защищает от радиоактивного излучения и исключает проникновение радионуклидов в окружающую среду. Транспортный контейнер многоразового использования обеспечивает безопасность при транспортировании РАО, а высокая механическая прочность самой капсулы позволяет ее использовать в хранилищах поверхностного, приповерхностного типа и (теоретически) при захоронении РАО в стабильных геологических формациях на глубинах более 300 м. Сама капсула является эффективным барьером изоляции РАО, что ликвидирует саму возможность миграции радионуклидов в районе хранилища.

Разработанные способы и конструкции для захоронения экологически опасных отходов в локальных контейнерах и хранилищах, армированными материалами из огненно-жидких шлаков силикомарганца на базе СКАРМ – технологии позволяют решить одну из актуальнейших проблем – защиту окружающей среды от накопленных экологически опасных отходов [8–11].

Выводы. Проведенные исследования позволили разработать энергосберегающую технологию изготовления изделий из кислых огненно жидких шлаковых техногенных отходов металлургического производства различных изделий, таких как плоские плиты, футерованные трубы, контейнеры для захоронения радиоактивных отходов, пестицидов и гербицидов и многих других изделий.

Список использованной литературы:

1. *Неведомский В.А.* Кристаллизационная способность расплава шлака силикомарганца с различным «тепловым прошлым» / *В.А. Неведомский* // *Расплавы*. – 1990. – № 2. – С. 62–69.
2. *Неведомский В.А.* Свойства расплава силикомарганцевого шлака / *В.А. Неведомский* // *Расплавы*. – 1989. – № 6. – С. 12–17.
3. *Минько Н.И.* Энергосберегающая технология стеклокристаллических изделий из огненно-жидких шлаков силикомарганца / *Н.И. Минько, В.А. Неведомский* // *Сталь*. – 1996. – № 2. – С. 70–73.
4. *Неведомский В.А.* Стеклокристаллические материалы и покрытия на основе огненно-жидких шлаков силикомарганца / *В.А. Неведомский* // *Строительные материалы*. – 1989. – № 11. – С. 14–15.
5. Радиоактивные отходы Украины: состояние, проблемы, решения / *О.А. Авдеев, А.А. Кретинин, А.И. Леденев, В.В. Скворцов, В.В. Удод, А.А. Шахов*. – К. : Изд. центр «ДрУк». – 2003. – 400 с.
6. *Лебедева Г.А.* Каменное литье как радиационно-стойкий материал / *Г.А. Лебедева, Г.П. Озерова* // *Строительные материалы*. – 1998. – № 5. – С. 14–15.
7. *Косинская А.В.* Камнелитые материалы для получения коррозионно- и радиационно-стойких изделий / *А.В. Косинская, С.С. Затуловский* // *Литейное производство*. – 2001. – № 10. – С. 21–22.
8. Принцип «ZERO WASTE» при переработке шлаков ферросплавного производства / *В.А. Неведомский, А.В. Чернышов, А.А. Чернышов, Т.А. Губская* // *Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. Серия : Технические науки*. – Днепродзержинск : ДДТУ, 2016. – Вып. 1 (28). – С. 16–19.
9. Пат. 50285 Україна. Контейнер для збереження і/чи транспортування екологічно небезпечних речовин і радіоактивних відходів низької і середньої активності / *Ялович О.І., Куцїн В.С., Неведомський В.О.*

- Синяговський В.І., Тимофеев О.Ю., Білокурів Д.Е.* ; заявник і патентовласник Український інститут промислової власності ; опубл. Київ, 2002. – Бюл. № 10.
10. Пат. 70083 Україна. Спосіб футерування порожнистого металевого виробу / *Яловий О.І., Куцін В.С., Неведомський В.О., Синяговський В.І., Тимофеев О.Ю., Кузьменко В.І.* ; заявник та патентовласник Український інститут промислової власності ; опубл. Київ, 2004. – Бюл. № 9.
11. *Неведомский В.А.* Специальные виды литья из огненно-жидких шлаков для хранения радиоактивных и токсичных отходов / *В.А. Неведомский, Н.С. Михайленко* // Экология и промышленность. – 2008. – № 4. – С. 77–83.

References:

1. Nevedomskij, V.A. (1990), «Kristallizacionnaja sposobnost' rasplava shlaka silikomarganca s razlichnym «teplovym proshlym», *Rasplavy*, No. 2, pp. 62–69.
2. Nevedomskij, V.A. (1989), «Svojstva rasplava silikomargancevogo shlaka», *Rasplavy*, No. 6, pp. 12–17.
3. Min'ko, N.I. and Nevedomskij, V.A. (1996), «Jenergoberegajushhaja tehnologija steklokristallicheskih izdelij iz ognenno-zhidkih shlakov silikomarganca», *Stal'*, No. 2, pp. 70–73.
4. Nevedomskij, V.A. (1989), «Steklokristallicheskie materialy i pokrytija na osnove ognenno-zhidkih shlakov silikomarganca», *Stroitel'nye materialy*, No. 11, pp. 14–15.
5. Avdeev, O.A., Kretinin, A.A., Ledenev, A.I., Skvorcov, V.V., Udod, V.V. and Shahov, A.A. (2003), *Radioaktivnye othody Ukrainy: sostojanie, problemy, reshenija*, Izd. centr «DrUk», Kiev, 400 p.
6. Lebedeva, G.A. and Ozerova, G.P. (1998), «Kamennoe lit'e kak radiacionno-stojkij material», *Stroitel'nye materialy*, No. 5, pp. 14–15.
7. Kosinskaja, A.V. and Zatulovskij, S.S. (2001), «Kamnelitye materialy dlja poluchenija korrozionno- i radiacionno-stojkih izdelij», *Litejnoe proizvodstvo*, No. 10, pp. 21–22.
8. Nevedomskij, V.A., Chernyshov, A.V., Chernyshov, A.A. and Gubskaja, T.A. (2016), «Princip «ZERO WASTE» pri pererabotke shlakov ferrosplavnogo proizvodstva», *Sbornik nauchnyh trudov Dneprodzerzhinskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, Serija *Tehničeskije nauki*, Vol. 1 (28), DDTU, Dneprodzerzhinsk, pp. 16–19.
9. Jalovij, O.I., Kucin, V.S., Nevedomskij, V.O., Sinjagovskij, V.I., Timofeev, O.Ju. and Bilokurov, D.E., Український інститут промислової власності (2002), *Kontejner dlja zberezhennja i/chi transportuvannja ekologično nebezpečnih rečov i radioaktivnih vidhodiv niz'koj i seredn'oj aktivnosti* [Container for the storage and / or transportation of environmentally hazardous substances and radioactive wastes of low and medium activity], State Register of Patents of Ukraine, Київ, UA, Pat. № 50285.
10. Jalovij, O.I., Kucin, V.S., Nevedomskij, V.O., Sinjagovskij, V.I., Timofeev, O.Ju. and Kuz'menko, V.I., Український інститут промислової власності (2004), *Sposib futeruvannja porozhnistogo metalovogo virobu* [Method of lining a hollow metal product], State Register of Patents of Ukraine, Київ, UA, Pat. № 70083.
11. Nevedomskij, V.A. and Mihajlenko, N.S. (2008), «Special'nye vidy lit'ja iz ognenno-zhidkih shlakov dlja hranenija radioaktivnyh i toksichnyh othodov», *Jekologija i promyšlennost'*, No. 4, pp. 77–83.

Неведомський Володимир Олексійович – кандидат технічних наук, технічний директор ООО «ТехноСКАРМ», м. Нікополь.

Наукові інтереси:

– енергоресурсозбереження в машинобудівній та металургійній промисловості.

E-mail: nevedomsky47@gmail.com.

Чернишов Олександр Васильович – старший викладач кафедри технології машинобудування Дніпровського технічного університету.

Наукові інтереси:

– енергоресурсозбереження в машинобудівній та металургійній промисловості.

E-mail: avch2006@ukr.net.

Чернишов Олександр Олександрович – інженер 1-ї категорії Дніпровського металургійного комбінату.

Наукові інтереси:

– енергоресурсозбереження в машинобудівній та металургійній промисловості.

E-mail: haruga-1@ukr.net.

Стаття надійшла до редакції 04.10.2017.