



УДК 621.742.486, УДК 621.743.42

Поступила 22.02.2018

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖИДКОСТЕКОВЫХ СМЕСЕЙ. Ч. 2. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ

А. Н. КРУТИЛИН, Ю. Ю. ГУМИНСКИЙ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: kantminsk@gmail.com,
Л. В. КУЛЬБИЦКАЯ, ГНУ «Институт общей и неорганической химии» НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Сурганова, 9/1. E-mail: anna119@igic.bas-net.by

Обобщены способы электрофизического воздействия на структуру силикатных связующих и жидкостекловых смесей, используемые для улучшения их свойств. Рассмотрены такие способы воздействия, как ультразвуковые, магнитные, электрические и электрогидравлические. Большой интерес представляют возможности совмещения физических и химических методов модифицирования жидкого стекла. Применение электрофизических методов воздействия позволяет сократить количество дорогостоящих и дефицитных связующих материалов, повысить производительность труда на участках смешивания и изготовления форм и стержней. Кроме того, электрофизические методы позволяют сократить длительность приготовления силикатных связующих материалов.

Ключевые слова. Жидкое стекло, связующее, жидкостекловые смеси, электрофизическое воздействие, электромагнитная обработка.

Для цитирования. Крутилин А. Н. Повышение эффективности использования жидкостекловых смесей. Ч. 2. Электрофизические способы воздействия / А. Н. Крутилин, Ю. Ю. Гуминский, Л. В. Кульбицкая // Литье и металлургия. 2018. Т. 91. № 2. С. 50–56.

EFFICIENCY UPGRADING IN UTILIZATION OF LIQUID–GLASS MIXTURES. PART 2. ELECTROPHYSICAL METHODS OF ACTION

A. N. KRUTILIN, Yu. Yu. HUMINSKI, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: kantminsk@gmail.com,
L. V. KULBITSKAYA, SSI Institute of General and Inorganic Chemistry of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 9/1, Surganova str. E-mail: anna119@igic.bas-net.by

The methods of electrophysical influence on the structure of silicate binders and liquid-glass mixtures to improve their properties are generalized. Methods of influence such as ultrasonic, magnetic, electric and electrohydraulic are considered. Of great interest are The possibilities of combining physical and chemical methods of modification of liquid glass are lucrative ones.

Application of electrophysical methods of influence allows to reduce quantity of expensive and scarce binding materials, to increase labor productivity at mixed preparation sites and at production of forms and cores shops. The electrophysical methods allow to reduce duration of preparation of silicate binding materials.

Keywords. Liquid glass, binder; liquid glass mixtures, electrophysical impact, electromagnetic processing.

For citation. Krutilin A. N., Huminski Yu. Yu., Kulbitskaya L. V. Efficiency upgrading in utilization of liquid-glass mixtures. Part 2. Electrophysical methods of action. Foundry production and metallurgy, 2018, vol. 91, no. 2, pp. 50–56.

Обзорная информация

Использование внешних электрических полей позволяет оказывать существенное влияние на физико-химические и технологические свойства связующих материалов и формовочных смесей.

Жидкое стекло – это коллоидный раствор, который обладает электрической проводимостью. Коллоидная частица, находящаяся в растворе, имеет двойной электрический слой, состоящий из плотной и диффузионной частей. Электрическая проводимость раствора зависит от заряда и подвижности коллоидных частиц и ионов, находящихся в растворе, она определяется электропроводностью коллоидных частиц и ионов диффузионной части двойного электрического слоя. Формирование технологических

свойств смесей, прежде всего адгезионной прочности, неразрывно связано с образованием двойного электрического слоя на границе раздела фаз. Структура и характеристики слоя зависят от электрофизических свойств контактирующих фаз, наличия глинистых и оксидных пленок на поверхности зерен песка. Удельная электрическая проводимость связующего материала определяется исходными физико-химическими свойствами и температурой. Удельная электрическая проводимость смеси зависит от удельной электрической проводимости связующего материала, равномерности его распределения на поверхности зерен песка, а также степени уплотнения смеси и ее температуры.

В результате ослабления водородных связей и повышения степени диссоциации функциональных групп количество свободных носителей заряда в растворе, а, следовательно, и удельной электропроводности увеличивается. Дополнительная диссоциация способствует увеличению заряда цепи макромолекул. Снижение удельной электрической проводимости связующего материала, а также смеси, приготовленной на его основе, происходит из-за уменьшения количества диссоциированных функциональных групп, которые в процессе твердения вступают в реакции полимеризации и поликонденсации.

В процессе теплового воздействия увеличение степени диссоциации связующего способствует возрастанию электропроводности, дальнейшая полимеризация ведет к падению электропроводности. Уменьшение количества свободных носителей зарядов в случае химического отверждения ведет к снижению электропроводности сразу после смешивания.

Взаимосвязь между величиной электрической проводимости и степенью отверждения связующего материала позволяет контролировать длительность отверждения смесей, что особенно важно для определения оптимальных технологических параметров процесса.

Органические связующие вещества, которые могут использоваться в качестве модификаторов, являются в основном растворами высокомолекулярных соединений, их электропроводность определяется присутствием в растворе низкомолекулярных примесей, особенно электролитов, которые служат источниками возникновения слабосвязанных или свободных ионов. Эти связующие – своеобразные иониты, способные в растворе диссоциировать на высокомолекулярные катионы и анионы. Ионы, которые образуются при диссоциации, участвуют в переносе электрических зарядов и определяют электропроводность растворов высокомолекулярных соединений. При наложении постоянного электрического поля происходит ориентация макромолекул и функциональных групп вдоль его силовых линий, в переменном поле функциональные группы начинают совершать колебательные движения. Под действием электрического поля происходит перераспределение ионов в двойном слое, появляется ионная составляющая дипольного момента, увеличивается электрический момент макромолекулы полимера (коллоидной частицы). Активация смесей в переменном электрическом поле обеспечивает более значительное уменьшение вязкости связующего и повышение прочностных свойств смеси, чем в постоянном поле, что обусловлено ускорением процесса трансляционного движения молекул связующего под влиянием внешнего знакопеременного поля.

Электрофизические методы воздействия позволяют существенно интенсифицировать процессы растворения, они способствуют раскручиванию макромолекул модификатора из глобулярной в фибриллярную конформацию, что обеспечивает повышенную реакционную способность модификатора за счет высвобождения и ионизации новых функциональных групп. В результате интенсифицируются процессы образования водородных связей между функциональными группами макромолекул модификатора, а также макромолекулами и кремнекислородной частью связующего, создаются условия для структурирования связующего полимерной пространственной сеткой модификатора [1].

Согласно разработанной теории модифицирования [2], вводимые в жидкое стекло модификаторы должны образовывать фрагментарные надмолекулярные пространственные структуры. Это реализуется как за счет возникновения водородных связей между активными функциональными группами макромолекул, так и за счет межмолекулярного взаимодействия указанных групп со структурными составляющими связующего. Образовавшиеся пространственные сетчатые структуры при отверждении жидкого стекла исполняют роль защитного коллоида, препятствующего росту размеров новообразований. Играв роль мостиков, объединяющих структурные составляющие продуктов отверждения связующего, они пластифицируют отвержденную вязкую композицию посредством армирования эластичными пространственными сетками. Этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяют водорастворимые полимерные соединения, отличительной особенностью которых является линейная или разветвленная структура макромолекул, содержащая активные функциональные группы OH , NH_2 , COOH , COOMe , CONH_2 .

Среди наиболее распространенных способов воздействия на структуру связующих материалов можно выделить ультразвуковую, магнитную, электрическую и электрогидравлическую обработки растворов и дисперсий.

В основе ультразвуковой обработки материалов лежит физический эффект, который связан с особенностями распространения упругих колебаний в жидкости с частотой выше 16 кГц. Упругие механические колебания способствуют возникновению в жидкости чередующихся зон сжатия и растяжения, образованию большого количества разрывов сплошности в виде мельчайших пузырьков, что ведет к появлению в жидкости микроударных волн и микропотоков. Захлопывание пузырьков вызывает локальный разогрев вещества.

Импульсные гидродинамические возмущения большой интенсивности вызывают разрушение поверхностей твердых тел, контактирующих с жидкостью. Вследствие усталостного разрушения наиболее слабых межкристаллитных связей кавитация ведет к диспергированию неоднородностей, находящихся в жидкости. Возбуждение в жидкости колебаний изменяет характер движения молекул и активизирует диффузионные процессы. Интенсификация процессов, инициирование химических реакций, разрушение твердых тел (диспергирование), дегазация в ультразвуковом поле связаны с параметрами кавитации. Известно, что под действием кавитации происходит расщепление молекул (в основном воды) на радикалы, воздействие на макромолекулы приводит к деструкции молекул полимеров и т.д.

Удаление влаги из материала под влиянием интенсивных акустических колебаний (ультразвуковая сушка) связано с ускорением процессов теплообмена в ультразвуковом поле. При высокой влажности капиллярно-пористых материалов происходит чисто механическое удаление влаги вследствие дробления капель под действием сильных акустических потоков и появления капиллярных волн.

Способ изготовления форм и стержней из жидкостекольных смесей, упрочненных ультразвуком, позволяет уменьшить количество связующего, повысить поверхностную и объемную прочность, улучшить условия труда. Обработка жидкого стекла ультразвуком разбивает глобулы силикагеля на более мелкие части, что ведет к их более плотной упаковке. Под действием ультразвука происходит разогрев смеси, связующее быстро теряет влагу и упрочняется. Оптимальные условия ультразвуковой обработки позволяют значительно увеличить общую и поверхностную прочность (приблизительно в 3 раза) при хорошей газопроницаемости. Для получения упрочненного слоя толщиной 40–50 мм необходимо 20–30 с при частоте ультразвука 18–22 кГц и амплитуде 0,4–0,7 мм. Не рекомендуется обрабатывать смеси с влажностью более 0,8% [3].

На основании измерений коэффициентов светорассеивания и светопоглощения установлено, что при обработке жидкого стекла ультразвуком происходит изменение степени конденсации кремнекислородных анионов. Прочность на сжатие жидкостекольной смеси, отвержденной сложным эфиром, увеличилась на 20% [4].

Действие магнитных полей связывают с наличием в воде примесей [5]. Если при омагничивании чистой воды образовавшаяся структура сетки водородных связей сразу после снятия поля распадается, то при обработке растворов их структура и свойства остаются сравнительно стабильными и изменяются в зависимости от состава и концентрации растворенных веществ.

Переменное магнитное поле возбуждает в жидкости мощные токи, что приводит к изменению структуры водно-дисперсных систем, степени гидратации. Асимметрия гидратных оболочек создает условия, способствующие движению элементов в жидкую фазу [6, 7].

Повышению эффективности использования жидкостекольных смесей посредством химического модифицирования жидкого стекла в процессе его электрофизической обработки посвящена работа [8]. Доказана принципиальная возможность модифицирования жидкостекольного связующего материала высокомолекулярными соединениями в процессе его обработки в электрическом поле или высоковольтными импульсными электрическими разрядами.

При электрогидравлической обработке на порядок уменьшается количество энергии, необходимой для растворения модификаторов. Под воздействием электрического поля и высоковольтных импульсных электрических разрядов происходит образование ударной волны и высокоскоростных гидродинамических потоков, которые интенсифицируют процесс растворения полимерных модификаторов в жидком стекле. Создаются условия для «раскручивания» молекулярных клубков органического полимера и образования фрагментарных пространственных сеток, что приводит к повышению способности модификаторов адсорбироваться на кремнекислородной поверхности.

Под воздействием электрического разряда при дроблении коллоидных частиц жидкого стекла активная кремнекислородная поверхность взаимодействует с функциональными группами модификатора, что обеспечивает закрепление его в силикатной матрице и фиксирование раздробленной коллоидной структуры связующего.

Установлено, что увеличение площади поверхности кремнекислородной составляющей создает дополнительные условия для повышения в момент гелеобразования адсорбции модификаторов на зародышах кремниевой кислоты. Наряду с наличием в объеме связующего взаимопроникающих пространственных сеток органического модификатора это обеспечивает получение дисперсной структуры продуктов отверждения, обладающих повышенными прочностными свойствами.

Электрогидравлическое модифицирование жидкого стекла исследуемыми модификаторами в зависимости от типа отвердителя приводит к повышению прочностных характеристик смесей на 20–60%, пластичности – в 1,5–2,0 раза. Время перемешивания смеси, отверждаемой CO_2 и сложным эфиром, сокращается на 10–15%, текучесть смеси повышается на 15–20%.

Определены оптимальные значения основных параметров импульсных электрических разрядов, обеспечивающие эффективное модифицирование жидкого стекла, установлены оптимальные составы модифицирующих комплексов, позволяющие уменьшить содержание связующего при отверждении CO_2 ацетатэтиленгликолем и двухкальциевым силикатом на 15–25%, сохранив при этом прочностные показатели на уровне смесей, содержащих исходное жидкое стекло [8].

В работе [9] приведен перспективный способ сушки форм и стержней путем использования метода электроосматического обезвоживания (передвижение влаги от положительного электрода – модель к отрицательному – опока). Способ позволяет в 2 раза сократить затраты электроэнергии по сравнению с тепловой сушкой. При наложении постоянного электрического поля молекулы воды перемещаются в сторону катода, а молекулы связующего – к аноду. В результате обработки происходит повышение концентрации связующего в поверхностном слое, прочностные характеристики смеси в сухом состоянии выше на 15–20%, чем при тепловой сушке. Наличие токопроводящих порошков различных металлов (Al, Mg и т. д.) или применение графита или шунгита для повышения противопригарных свойств позволяет осуществлять поверхностное модифицирование наполнителя. Вследствие увеличения сил адгезии в электрическом поле поверхность подсушенного слоя покрывается сплошным равномерным слоем частиц токопроводящего порошка.

Известно использование электрофореза в процессе формирования оболочковых форм [10]. Взвешенные в дисперсионной среде частицы пылевидного огнеупорного наполнителя перемещаются к одному из электродов, покрытому токопроводящей пленкой (блоку моделей). Электрический заряд на поверхности твердых частиц образуется в результате ионизации поверхности или за счет адсорбции ионов электролита, специально вводимого в дисперсионную среду. Напряжение 30–60 В обеспечивает получение плотной оболочки толщиной 5–8 мм.

Для интенсификации процессов сушки стержней, возможно, использовать токи высокой частоты. Энергия высокочастотного нагрева расходуется на нагрев диэлектрика. Вследствие быстрого роста температуры по всему объему происходит удаление свободной влаги и увеличение скорости гелеобразования, что вызывает интенсивное нарастание прочности смеси. Достижение максимальной прочности происходит через 35–45 с. Необходимо исключить удаление влаги из геля, который становится хрупким, в противном случае происходит резкое снижение прочности [11].

Для повышения вязущих свойств водных систем представляет интерес использование магнитной обработки. Использование жидкого стекла, обработанного при напряженности магнитного поля 3000 Э (37,7 А/м), позволило повысить прочность смеси на 12–50%. Омагничивание жидкого стекла способствует увеличению прочности смесей на 40–60%, позволяет уменьшить в их составе содержание жидкого стекла и феррохромового шлака на 30–40% без ухудшения исходных физико-механических свойств смесей и в 3–5 раз уменьшить их работу выбивки [12, 13].

Результаты исследований показывают, что электромагнитная обработка жидкостекляного связующего дает возможность на 30–40% повысить прочностные свойства самотвердеющей жидкостекляной смеси, на 1,5% уменьшить расход связующего и на 30–40% улучшить выбиваемость стержней из отливок [14]. Высокая скорость релаксации и низкая стабильность свойств активированного электрическим полем или омагниченного жидкостекляного связующего материала могут быть объяснены тем, что жидкое стекло представляет собой подвижную систему, подверженную существенным изменениям, обусловленным различными причинами. Структура и свойства жидкого стекла, образовавшиеся в резуль-

тате электрофизического воздействия, в очень короткий промежуток времени релаксируют до исходного состояния. Все это сдерживает широкое внедрение такого метода в литейных цехах.

В работе [15] на основании систематизированного анализа автор предложил направления дальнейших исследований с целью создания высокоэффективных модифицированных силикатных связующих материалов. На комплексной основе предложен принципиально новый подход к созданию модифицированного силикатного (жидкостекольного) связующего материала, обладающего отличной от жидкого стекла структурой и свойствами. Экспериментально доказана возможность создания оптимальной структуры силикатного связующего материала, что достигается в процессе гидротермального растворения силикат-глыбы в водных растворах высокомолекулярных соединений. Основное влияние на процесс формирования когезионной прочности отвержденной пленки модифицированных силикатных связующих оказывает адсорбционная активность модификатора.

Разработаны новые способы интенсификации процесса автоклавного модифицирования силикатных связующих материалов с использованием электрического поля. Использование электрофизических методов обработки (электрогидравлической и дезинтегральной) позволило получить модифицированные силикатные связующие материалы, аналогичные по свойствам, модифицированным силикатным связующим автоклавного производства.

Составы смесей отличаются высокой реакционной способностью, пластичностью, прочностью, а также облегченной выбиваемостью из отливок.

Получение равномерно распределенной по поверхности зерен наполнителя пленки связующего материала позволило наиболее полно реализовать адгезионные свойства связующего материала. Разработаны способы ультразвуковой и электрогидравлической регенерации жидкостекольных смесей.

При температурах свыше 400 °С в отвержденной пленке модифицированного силикатного связующего происходит деструкция органической полимерной составляющей, что приводит к нарушению сплошности структуры и резкому снижению когезионной прочности, т. е. к улучшению выбиваемости смесей из отливок.

Вследствие деструкции полимерных модификаторов образующиеся термостойкие карбонизированные продукты, блокирующие глобулы силикагеля, способствуют увеличению температуры плавления силикатной системы. При этом если высокомолекулярные углеводородные модификаторы способны смещать эту температуру максимум до 845–850 °С, то полимерные фосфаты натрия в результате взаимодействия с силикатом натрия при высоких температурах способствуют образованию многокомпонентной системы, имеющей температуру плавления 1020–1030 °С. Нагрев до высоких температур и последующее охлаждение форм и стержней приводит к их существенному разупрочнению, т.е. улучшению выбиваемости, что связано с повышением величины внутренних напряжений и снижением когезионной прочности пленок связующего, подвергающихся подобным термоциклическим нагрузкам.

Показано, что использование электрофизических методов дает возможность получать модифицированные силикатные связующие материалы, аналогичные по своим свойствам, полученным при автоклавном растворении.

Разработке нового способа приготовления жидкого стекла, составов формовочных и стержневых смесей на его основе, обеспечивающих улучшение выбиваемости из отливок и необходимый уровень технологических свойств при минимальном содержании жидкого стекла, посвящены работы [15, 16]. Проведены исследования свойств жидкостекольного связующего, полученного безавтоклавным способом растворения щелочного силиката натрия ударно-волновой обработкой (УВО).

Выявлены закономерности и особенности процесса, происходящие при отверждении смесей на жидкостекольном связующем, полученном из нанодиспергированного ударно-волновой обработкой щелочного силиката натрия. Ударно-волновая обработка позволяет получать наноразмерные порошки натриевой силикат-глыбы с размерами частиц основной фракции от 100 до 200 нм, что достигается при реализации импульса давления в диапазоне 0,12–0,16 МПа·с.

Гранулометрический состав диспергированного щелочного силиката натрия и кремнеземсодержащих компонентов зависит от величины импульса давления. Время растворения наноразмерного щелочного силиката натрия при температуре воды 80 °С сокращается до 5 мин, т.е. на порядок меньше по сравнению с известными способами, используемыми при производстве жидкого стекла.

Возрастание адгезии жидкого стекла к кварцу ведет к уменьшению краевого угла смачивания кварца на 18–20%, в результате происходит упрочнение манжет и формирование более плотных пленок на зернах наполнителя. Смеси на предлагаемом связующем обладают повышенными прочностными свойствами.

ми, лучшими показателями живучести и осыпаемости по сравнению с аналогичными смесями на жидком стекле, полученном автоклавным способом. Сокращение содержания жидкостекольного связующего в смесях до 4% за счет повышения прочности последних на 25–30% позволило существенно улучшить выбиваемость. Величина работы выбивки смесей независимо от способа отверждения уменьшается во всем исследуемом интервале температур.

Перспективным направлением является совмещение физических и химических методов модифицирования жидкого стекла. Физические поля способствуют интенсификации процессов растворения химических добавок в связующем материале. Эффективно используемые в процессе автоклавного растворения материалы в большинстве случаев очень плохо растворяются в жидком стекле при нормальных условиях. Наличие физических полей способствует раскручиванию полимерных цепочек модификатора, инициированию новых реакций с образованием водородных или химических связей между ними и мицеллами жидкого стекла, в результате происходит изменение структуры связующего и его физико-химических свойств.

Применение электрофизических методов воздействия позволяет на 20–30% сократить количество дорогостоящих и дефицитных связующих материалов, в 2–4 раза повысить производительность труда на участках смесеприготовления и изготовления форм и стержней, на 60–80% уменьшить длительность приготовления силикатных связующих материалов.

Основными недостатками электрофизических методов воздействия являются кратковременность сохранения связующим приобретенных свойств, трудность обеспечения стабильности эффекта обработки, а также отсутствие централизованного изготовления необходимого оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кукуй Д. М. Новые направления развития жидкостекольных смесей / Д. М. Кукуй // Обзорная информация. Технология литейного производства. Минск: БелНИИТИ, 1990. 64 с.
2. Кукуй Д. М. Исследование процессов активации связующих материалов электрическими полями: дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1974. 207 с.
3. Иванов Н. Х. Упрочнение смесей ультразвуком при изготовлении стержней / Н. Х. Иванов // Литейное производство. 1975. № 9. 26 с.
4. Jelinek P. und Petricova, Ostrava, Hahnel U. und Flemmingtg E., Freiberg. Möglichkeiten der Modifizierung von Wasserglaslösungen durch Magnetfeld und Ultraschallbehandlung und praktische Erfahrungen bei der Anwendung von magnetbehandelten Wasserglaslösungen in der ČSSR (Teil 1). Giessereitechnik, 1981. Vol. 12. P. 370–373.
5. Классен В. И. Омагничивание водных систем / В. И. Классен. М.: Химия, 1982. 296 с.
6. Аксельрод Г. А. Растворение твердых веществ / Г. А. Аксельрод, А. Д. Молчанов. М.: Химия, 1977. 268 с.
7. Повх И. Л. Техническая гидродинамика / И. Л. Повх. М.: Машиностроение, 1969. 542 с.
8. Иодо А. Е. Исследование, разработка и внедрение технологического процесса электрогидравлического модифицирования жидкого стекла: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1990. 20 с.
9. Ледян Ю. П. Состояние и перспективы использования электронно-ионной технологии в литейном производстве / Ю. П. Ледян, Д. М. Кукуй, А. М. Дмитриевич // Обзорная информация. Минск, 1978. 55 с.
10. Рыжков И. В. Электрофорез в литейном производстве / И. В. Рыжков, В. Д. Пепенко, А. А. Ридный и др. // Литейное производство. 1977. № 11. С. 30–31.
11. Дорошенко С. П. Исследование процесса твердения стержневых смесей в электрическом поле токов высокой частоты / С. П. Дорошенко, К. И. Ващенко, М. И. Прилуцкий и др. // Формовочные материалы и формообразование. Киев: ИПЛ АН УССР. 1975.
12. Вишняков Х. И. Жидкостекольные самотвердеющие смеси с омагниченным связующим / Х. И. Вишняков // Литейное производство. 1976. № 2. С. 21.
13. Писаренко И. Н. Магнитная обработка композиции феррохромовый шлак – жидкое стекло – вода / И. Н. Писаренко, Н. П. Юрченко // Литейное производство. 1975. № 10. С. 21.
14. Sojkova R., Novotny V. Mornosti praktickeho vyuziti zpracovane vodniho skla v magnetickempoli // Slevarenstvi. 1978. Vol. 26. No 2–3. P. 96–99.
15. Кукуй Д. М. Теоретические основы упрочнения и разработка технологических, химических и электрофизических методов интенсификации процессов отверждения и регенерации жидкостекольных смесей: дис. ... д-ра техн. наук. Минск, 1987. 643 с.
16. Юрасов В. В. Исследование растворения силикат-глыбы, активированной ударно-волновой обработкой / В. В. Юрасов, Т. Ш. Сильченко, Н. А. Кидалов и др. // Литейщик России. 2008. № 10. С. 33–35.
17. Юрасов В. В. Разработка жидкостекольного связующего для смесей литейного производства из нанодиспергированных ударно-волновой обработкой щелочных силикатов натрия / В. В. Юрасов, Т. Ш. Сильченко, Н. А. Кидалов и др. // Литейщик России. 2011. № 2. С. 42–46.

REFERENCES

1. Kukuj D. M. Novye napravleniya razvitiya zhidkostekol'nyh smesey [New directions of development of liquid-glass mixtures]. *Obzornaya informaciya. Tekhnologiya litejnogo proizvodstva = Overview information. Technology of foundry*. Minsk, BelNIINTI Publ., 1990, 64 p.

2. **Kukuj D. M.** *Issledovanie processov aktivacii svyazyushchih materialov ehlektricheskimi polyami. Diss. kand. tekhn. nauk* [Research of the processes of activation of binding materials by electric fields. Ph. D. In Engineering]. Minsk, 1974. 207 p.
3. **Ivanov N. H.** Uprochnenie smesey ul'trazvukom pri izgotovlenii sterzhnej [Strengthening of mixtures by ultrasound in the manufacture of rods]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 1975, no. 9, pp. 26.
4. **Jelinek P. und Petricova, Ostrava, Hahnel U. und Flemmingt E., Freiberg.** Moglichkeiten der Modifizierung von Wasserglaslosungen durch Magnetfeld und Ultraschallbehandlung und praktische Erfahrungen bei der Anwendung von magnetbehandelten Wasserglastosunaen in der ČSSR (Teil 1). *Giessereitechnik*, 1981, no. 12, pp. 370–373.
5. **Klassen V. I.** *Omagnichivanie vodnyh sistem* [Magnetization of water systems]. Moscow, Khimiya Publ., 1982. 296 p.
6. **Aksel'rod G. A., Molchanov A. D.** *Rastvorenie tverdyh veshchestv* [Dissolution of solids]. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 268 p.
7. **Povh I. L.** *Tekhnicheskaya gidrodinamika* [Technical Hydrodynamics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 542 p.
8. **Iodo A. E.** *Issledovanie, razrabotka i vnedrenie tekhnologicheskogo processa ehlektrogidravlicheskogo modifitsirovaniya zhidkogo stekla. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Research, development and implementation of the technological process of electro-hydraulic fluid glass modification. Abstract of Ph. D. In Engineering]. Minsk, 1990. 20 p.
9. **Ledyan Yu. P., Kukuj D. M., Dmitrovich A. M.** Sostoyanie i perspektivy ispol'zovaniya ehlektronno-ionnoj tekhnologii v litejnom proizvodstve [The state and prospects of the use of electron-ion technology in foundry]. *Obzornaya informatsiya = Overview information*. Minsk, 1978. 55 p.
10. **Ryzhkov I. V., Pepenko V. D., Ridnyj A. A.** Elektroforez v litejnom proizvodstve [Electrophoresis in foundry]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 1977, no. 11, pp. 30–31.
11. **Doroshenko S. P., Vashchenko K. I., Priluckij M. I.** Issledovanie processa tverdeniya sterzhnevyyh smesey v ehlektricheskom pole tokov vysokoy chastoty [Investigation of the hardening of core mixtures in the electric field of high-frequency currents]. *Formovochnye materialy i formoobrazovanie = Molding materials and shaping*. Kiev, IPL AN USSR Publ., 1975.
12. **Vishnyakov H. I.** Zhidkostekol'nye samotverdeyushchie smesi s omagnichennym svyazuyushchim [Liquid-glass self-hardening mixtures with a magnetized binder]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 1976, no. 2, pp. 21.
13. **Pisarenko I. N., Yurchenko N. P.** Magnitnaya obrabotka kompozitsii ferrohromovyy shlak – zhidkoe steklo – voda [Magnetic treatment of the composition ferrochrome slag – liquid glass – water]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 1975, no. 10, pp. 21.
14. **Cojkova R., Novotny V.** Mornosti praktickeho vyuziti zpracovane vodniho skla v magnetickempoli, *Slevarenstvi*, 1978, vol. 26, no. 2–3, pp. 96–99.
15. **Kukuj D. M.** *Teoreticheskie osnovy uprochneniya i razrabotka tekhnologicheskikh, himicheskikh i ehlektrofizicheskikh metodov intensifikatsii processov otverzheniya i regeneratsii zhidkostekol'nyh smesey. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Theoretical bases of hardening and development of technological, chemical and electrophysical methods of intensification of processes of solidification and regeneration of liquid-glass mixtures. Dr. tech. sci. diss]. Minsk, 1987. 643 p.
16. **Yurasov V. V., Sil'chenko T. Sh., Kidalov H. A.** Issledovanie rastvoreniya silikat-glyby aktivirovannoj udarno-volnovoy obrabotkoj [Study of the dissolution of a silicate block by activated shock wave processing]. *Litejshchik Rossii = Foundryman of Russia*, 2008, no. 10, pp. 33–35.
17. **Yurasov V. V., Sil'chenko T. Sh., Kidalov H. A.** Razrabotka zhidkostekol'nogo svyazuyushchego dlya smesey litejnogo proizvodstva iz nanodispersirovannyh udarno-volnovoy obrabotkoj shchelochnyh silikatov natriya [Development of a liquid-glass binder for mixtures of foundry production from nanodispersed by shock-wave treatment of alkali sodium silicates]. *Litejshchik Rossii = Foundryman of Russia*, 2011, no. 2, pp. 42–46.