



УДК 621.74.045
DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-38-44

Поступила 05.11.2018
Received 05.11.2018

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖИДКОСТЕКОВЫХ СМЕСЕЙ.

Ч. 4. КОМБИНИРОВАННОЕ УПРОЧНЕНИЕ

А. Н. КРУТИЛИН, Ю. Ю. ГУМИНСКИЙ, О. А. РУСЕВИЧ, 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

Описаны технологические приемы, применяемые для интенсификации процесса отверждения жидкостекловых смесей. Рассмотрено влияние физических и химических процессов на технологические свойства жидкостекловой смеси. Предложено применение комбинированных методов отверждения смеси, а также приведены примеры таких технологических процессов. Описано воздействие комбинированных методов на технологические свойства смеси. Обоснована необходимость проведения более тщательных исследований в данной области.

Ключевые слова. Упрочнение, тепловая обработка, стержни, жидкостекловые смеси, комбинирование, комплексное воздействие, модифицирование.

Для цитирования. Крутилин, А. Н. Повышение эффективности использования жидкостекловых смесей. Часть 4. Комбинированное упрочнение / А. Н. Крутилин, Ю. Ю. Гуминский, О. А. Русевич, Л. В. Кульбицкая // *Литье и металлургия*. 2018. № 4. С. 38–44. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-38-44.

IMPROVEMENT OF EFFICIENCY OF USE OF LIQUID–GLASS MIXTURES. PART 4. COMBINED STRENGTHENING

A. N. KRUTILIN, YU. YU. HUMINSKI, O. A. RUSEVICH, 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

Technological methods applied for intensification liquid-glass mixture hardening process are described. Influence of physical and chemical processes at liquid-glass mixtures technological properties are examined. The application of combined methods of hardening the mixture is proposed, as well as examples of such technological processes are given. The effect of combined methods on the technological properties of the mixture is described. The need for more hard research in this area is justified

Keywords. Strengthening, heat treatment, rods, liquid-glass mixtures, combining, complex effect modification.

For citation. Krutilin A. N., Huminski Yu. Yu., Rusevich O. A., Kulbitskaya L. V. Improvement of efficiency of use of liquid-glass mixtures. Part 4. Combined strengthening. *Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 4, pp. 38–44. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-38-44.

Обзорная информация

Современные направления в развитии технологий изготовления форм и стержней неразрывно связаны с использованием технологических процессов, основанных на отверждении смесей непосредственно в оснастке. Повышение технологичности изготовления отливок и качества литья, обеспечение высокой размерной точности форм и стержней связано не только с необходимостью получения высокого уровня технологических свойств смесей, но и с интенсификацией процессов их отверждения в оснастке. В зависимости от конкретных условий реального производства предлагается огромное количество разнообразных вариантов для улучшения технологических свойств смесей, однако отсутствие сравнительного анализа предлагаемых технологий затрудняет широкое распространение передового опыта предприятий. Известные на сегодняшний день технологические приемы, используемые для изготовления высоко-

качественных отливок в условиях массового производства (тепловое воздействие, химическое отверждение, введение реагентов в виде органических, минеральных или комбинированных добавок, электрофизические способы упрочнения), в полной мере не удовлетворяют требованиям производства из-за присущих им специфических недостатков. Физические методы воздействия на связующее пока не получили широкого практического применения, в первую очередь из-за невысокой стабильности положительного эффекта обработки. Наиболее перспективным направлением в технологических процессах изготовления форм и стержней из жидкостекольных смесей являются комбинированные способы упрочняющей обработки, которые объединяют преимущества известных способов. Это позволит увеличить эффективность их внедрения в реальных условиях производства.

Комбинированные способы упрочнения жидкостекольных смесей, как правило, сочетают химическое упрочнение, например, продувку стержня углекислым газом, и упрочнение тепловой обработкой [1].

В процессе упрочнения жидкостекольной смеси продувкой CO_2 происходит реакция замещения солей слабой ортокремневой кислоты солями угольной кислоты (карбонатами и гидрокарбонатами натрия и калия) с образованием рыхлой пространственной структуры. Вода в растворе жидкого стекла не испаряется, а иммобилизуется и удерживается гелем, который формирует трехмерный каркас и обеспечивает необходимые прочностные характеристики стержня. С увеличением продолжительности продувания углекислым газом возрастает общая величина поверхности образующегося геля кремневой кислоты, уменьшается толщина водных оболочек, изолирующих мицеллы друг от друга, ускоряется процесс полимеризации. Максимум прочности соответствует завершению процесса гидролиза, далее происходит снижение прочности, как следствие, возникновение трещин в пленке геля на поверхности наполнителя. Трещины ослабляют связь между зёрнами наполнителя и снижают общую прочность смеси [2]. Химическая упрочняющая обработка углекислым газом обеспечивает кратковременность упрочнения стержней в оснастке, что гарантирует высокую размерную точность стержней и отливок. Однако повышенная осыпаемость, высокая гигроскопичность, малая живучесть, затрудненная выбиваемость смесей из отливок ограничивают применение химического упрочнения в производственных условиях. Согласно данным экспериментальных исследований, наиболее эффективным является продувка стержней с минимальной скоростью углекислым газом в течение 20–25 с и разбавление углекислого газа обычным сжатым воздухом. Модуль жидкого стекла должен составлять 2,0–2,3, а плотность – 1480–1520 кг/м³ [3, 4].

Механизм упрочнения при тепловой обработке жидкостекольных смесей связан с концентрационной полимеризацией кремнекислоты, обезвоживанием связующего, формированием прочной стекловидной структуры в виде кремнекислородного каркаса, в котором катионы Na^+ связаны ионной связью с атомами кислорода. В процессе тепловой сушки при температурах 130–150 °С разупрочнение не наблюдается, так как происходит формирование прочного каркаса, максимальное значение прочности достигается при остаточной влажности смеси около 0,3%. Для обеспечения быстрого затвердевания, без снижения прочности, продувку углекислым газом рекомендуют проводить после термической обработки. При уменьшении продолжительности химической обработки углекислым газом прочность стержня после тепловой обработки возрастает, однако такая обработка не обеспечивает равномерность объемного упрочнения стержней. На практике время продувки стержней выбирают исходя из массы, размеров и конфигурации стержня.

Постепенное удаление влаги при тепловом упрочнении способствует формированию более плотной пленки силиката натрия на поверхности огнеупорного наполнителя, что позволяет существенно повысить прочностные характеристики смеси, конечная прочность значительно превышает величину прочности при продувке углекислым газом.

Технология отдельной тепловой обработки жидкостекольных стержней без комбинации с другими способами также имеет ограниченное применение, так как процесс является длительным и требует повышенных энергозатрат. Для испарения воды из связующего тепловую обработку обычно проводят вне стержневой оснастки, когда имеется большая открытая поверхность стержня. При извлечении стержня и его транспортировке возможно изменение размеров, что приводит к снижению размерной точности стержней и отливок.

Комплексное воздействие на жидкостекольные смеси путем совмещения теплового воздействия продувкой подогретым воздухом для нагрева смеси и продувки углекислым газом с целью ускорения отверждения, на первый взгляд, представляется очевидным решением, однако это ведет к резкому повышению скорости упрочнения.

Известно, что при тепловой сушке даже при сравнительно малом содержании жидкого стекла (около 5 мас.%) возможно получить высокие прочностные показатели: $\sigma_{\text{сж}}$ – до 15 МПа, $\sigma_{\text{раз}}$ – до 3 МПа [2].

В производственных условиях для широкой номенклатуры стержней рекомендуются технологически регламентируемые значения прочности на сжатие жидкостекольной смеси порядка 2,0–2,5 МПа. Чрезмерно высокая прочность стержней ведет к увеличению сопротивления усадке отливки, ухудшению выбиваемости смесей. Сопротивление формы и стержней оказывает влияние на процесс коробления отливок, которое обусловлено неравномерными пластическими деформациями отливки в процессе охлаждения. Торможение свободной усадки со стороны формы или стержней является основной причиной образования горячих (кристаллизационных) трещин. Оно происходит в температурном интервале ликвидус – солидус (интервал хрупкости) при температурах ниже температуры образования твердого скелета и начала линейной усадки, когда прочность сплава низкая.

Шведская фирма «Webac» использует технологический процесс изготовления стержней, в котором воздух предварительно нагревают до температуры 350–400 °С, на входе в стержневой ящик она снижается до 200–220 °С, а на выходе – до 80–100 °С. Продолжительность продувки составляет 40–60 с при давлении 0,15–0,2 МПа. Наиболее эффективно использовать данный процесс для изготовления тонкостенных стержней, так как в массивных стержнях трудно обеспечить равномерный доступ воздуха по всему объему стержня, что ведет к образованию прочных вертикальных столбов, между которыми смесь остается неотвержденной. Низкая теплопроводность жидкостекольных смесей затрудняет нагрев смеси. Для повышения температуры 1 кг смеси в стержне до 50 °С необходимо затратить до 500 дм³ воздуха при начальной температуре воздуха 200 °С. Затвердевание смесей при обработке углекислым газом протекает значительно быстрее, чем при тепловой обработке стержней при 200–250 °С [5, 6].

Комбинированный способ отверждения смесей на высококремнеземистом жидком стекле (ВКЖС) предлагают авторы работ [7–9]. Эффективность такой технологии достигается совмещением теплового упрочнения стержней на определенную глубину от поверхности (термо-шок-процесс) и скоростного химического (СО₂-продувка) или химико-вакуумного упрочнения остальной части стержня. Тепловая обработка обеспечивает высокую прочность, в 5–7 раз превышающую прочность после химического упрочнения углекислым газом. Улучшение выбиваемости смесей из отливок предлагается за счет повышения модуля жидкого стекла до 3,3–3,8 ед., что способствует более быстрому тепловому и химическому упрочнению при уменьшении удельного расхода углекислого газа. Гарантированное исключение осыпаемости стержня, формируемого тепловым упрочнением, достигается при минимальной толщине его поверхностной корочки около 3 мм. Для повышения общей прочности стержня при термохимическом упрочнении толщину наружного слоя нужно увеличить, однако толщина слоя более 30 мм не рекомендуется, так как значительно повышаются энергозатраты.

Использование вакуума позволяет проводить термовакуумное и термохимико-вакуумное упрочнение. Ускорение процесса термохимического упрочнения происходит вследствие улучшения фильтрации паров воды и углекислого газа через поры смеси путем использования вакуумирования форм и стержней в оснастке при разряжении 0,02–0,025 МПа.

Продолжительность формирования стержней сокращается при дополнительном воздействии вакуума, скорость упрочнения возрастает в 3–5 раз, а прочность, достигаемая химическим упрочнением, увеличивается на 30–35%. С увеличением модуля жидкого стекла возрастает количество воды, которое удаляется при низких температурах за более короткие промежутки времени.

Эффективность способа комбинированного отверждения смесей на высококремнеземистом жидком стекле связана с кратковременным интенсивным тепловым воздействием для отверждения стержня с поверхности в нагреваемой оснастке (термо-шок-процесс) и скоростного химического или химико-вакуумного упрочнения остальной части стержня.

Для улучшения смачиваемости огнеупорного наполнителя и снижения вязкости в состав ВКЖС предложено вводить добавки поверхностно-активных веществ в виде мочевины или алкилсурила. Введение добавок карбамида (0,2–0,6% от массы связующего) является предпочтительным, так как улучшает смачиваемость наполнителя жидким стеклом на 15–18%, при этом вязкость стекла падает. Карбамид практически не оказывает влияния на прочность смеси при СО₂-процессе, однако значительно увеличивает прочность смеси после тепловой обработки. Оптимальная прочность смеси достигается при содержании ВКЖС в количестве 5,5–7,0%. Улучшение выбиваемости достигается за счет повышения температуры силикатообразования жидкой фазы от 800 до 900–1100 °С.

Для формирования качественной поверхности стержней, изготавливаемых из смесей на ВКЖС в нагреваемой оснастке, предпочтение отдается скоростным способам гравитационно-ударного и пескодувного уплотнения.

В зависимости от конфигурации стержней, требований к их качеству и скорости упрочнения предложены различные варианты способа в комбинации с вакуумированием.

С целью улучшения технологических свойств используемых жидкостекольных смесей в работах [10–12] предложено применять технологические добавки органического (ТДОП-скоп) и неорганического происхождения (ТДНП – перманганат калия, бихромат калия, алюмокалиевые квасцы, карбонаты кальция и бария) в сочетании с физическими методами воздействия (вакуумирование и СВЧ-обработка) и их комбинаций.

Наличие большого количества свободных и активных радикалов (H^+ , OH^- , $COOH^-$ и др.) в структуре ТДОП, которые через водородные связи «сшивают» ортокремневую кислоту в полимерные цепочки, позволяет повысить и стабилизировать прочность формы. Отходы целлюлозно-бумажной промышленности (скоп) при высокотемпературном воздействии выгорают, выделяющиеся газы разрыхляют пленку силикагеля, что ведет к ослаблению когезионных связей и улучшению выбиваемости. В процессе термодеструкции перманганата и бихромата калия происходит выделение кислорода, который взаимодействует с кремнекислородным каркасом с образованием перекисных связей. Карбонаты кальция и бария при нагреве диссоциируют с образованием двуоксида углерода. При добавлении в смесь алюмокалиевых квасцов происходит ускоренное отверждение смеси, так как влажность смеси быстро снижается вследствие связывания свободной и кристаллизационной воды. В результате потери воды при температуре 120 °С алюмокалиевые квасцы переходят в «жженные», которые при высокотемпературном воздействии разлагаются с образованием газообразных продуктов, которые, разрыхляя силикатную основу, разрушают кремнекислородный каркас.

Авторы работ считают, что вакуумирование форм и стержней позволяет получить более плотную упаковку зерен огнеупорного наполнителя, процесс изготовления ЖСС с использованием CO_2 становится более управляемым.

Предлагаются различные варианты технологического процесса:

- использование скопа в комбинации с вакуумированием смеси при продувке CO_2 ;
- использование скопа в присутствии сильного окислителя перманганата или бихромата калия с продувкой CO_2 ;
- использование карбонатов кальция и бария с СВЧ-обработкой;
- использование алюмокалиевых квасцов с СВЧ-обработкой.

Вакуумирование смеси в оснастке, выдержка и постепенный сброс вакуума с подачей CO_2 способствуют испарению влаги из смеси. Приложение вакуума с разряжением 0,02–0,025 МПа ведет к эффективному вентилированию стержней в оснастке. В вакуумной камере необходимо поддерживать постоянное разряжение, не менее 40 мм рт. ст.

Для обеспечения низкой гигроскопичности и высокой поверхностной прочности необходимо обеспечить смачивание зерен наполнителя связующим, вакуумирование позволяет снизить количество жидкого стекла в смеси за счет изменения поверхностного натяжения наполнителя и связующего. Варьирование параметров вакуумирования позволяет смещать равновесие химических реакций, обеспечивать необходимые свойства стержня (прочность, газопроницаемость, влажность).

Процесс СВЧ-сушки определяется совокупностью процессов тепло- и массопереноса при изменении агрегатного состояния. СВЧ-нагрев не связан с передачей теплоты в форме, скорость и температура нагрева зависят от диэлектрической проницаемости смеси, частоты и мощности источника излучения. Смеси на основе кварцевых наполнителей являются лучшими объектами для использования СВЧ-нагрева, так как кварцевое стекло для этого диапазона длин волн практически прозрачно. Вода, присутствующая в смеси, как дипольная жидкость, обладает аномально высоким поглощением энергии электромагнитного поля в области сантиметровых длин волн. В процессе обработки потоком СВЧ-энергии вода переходит в пар одновременно по всему объему формы со скоростью, пропорциональной плотности тепловыделения. На скорость протекания процесса сушки оказывают влияние теплопроводность и термовлагопроводность материала. Электрические параметры высушиваемого материала непрерывно изменяются, поэтому режим работы магнетрона должен регулироваться. Различают мягкий и высокоинтенсивный режимы сушки. Мягкий или испарительный режим из-за инерционности процессов влагоперемещения при температурах меньше температуры кипения жидкой фазы смеси не дает существенного выигрыша во времени. Режиму высокоинтенсивной сушки соответствует плотность подводимой мощности от 0,2 до 3,0 кВт/кг, при дальнейшем увеличении плотности возникают режимы с повышенной нестабильностью.

В процессе сушки концентрация влаги в высушиваемом материале непрерывно изменяется, вода из жидкого состояния переходит в парообразное, внутри материала возрастает давление, которое может привести к разрушению структуры материала. Максимальная температура сушки определяется технологическими факторами, например, при сушке литейных форм и стержней температура сушки ограничена свойствами применяемых связующих материалов. Наличие различных примесей на поверхности зерен огнеупорного наполнителя, глинистой составляющей в составе песка, самого жидкого стекла оказывает влияние на процесс сушки, глубина эффективного воздействия СВЧ-обработки существенно уменьшается.

Технико-экономические показатели процесса в большой степени зависят от конструкции установки, целей ее использования. Оптимальные технологические параметры сушки во многом определяются конфигурацией и размерами формы, условиями подвода тепла к высушиваемому материалу, исходной влажностью материала.

Необходимо отметить, что сушка СВЧ-излучением позволяет снизить количество связующего в смеси, значительно сократить время отверждения смеси в оснастке. Высокая эффективность СВЧ-сушки обусловлена высоким КПД передачи энергии от магнетрона к материалу формы. Энергию высокочастотных электрических полей необходимо использовать на создание условий, интенсифицирующих перенос влаги из глубинных слоев к поверхности стержня. Применение комбинированных методов подвода тепла, например, высокочастотного и конвективного или воздействие электрических полей в импульсном режиме, позволяет значительно уменьшить расход электроэнергии. Осторожное отношение технологов к выбору и обоснованию оптимальных технологических параметров процесса связано с недостаточностью знаний по механизму тепло- и массопереноса при СВЧ-сушке жидкостекольных смесей.

Объемное выделение тепла при нагреве в электрическом поле токов высокой частоты (ТВЧ) связано с поворотом диполей и их колебанием под действием внешнего электрического поля. Механизм действия основан на явлении структурной, ионной и электронной поляризации. Энергия, затрачиваемая на поляризацию диэлектрика, генерируется в виде тепла. Движение связующего происходит под действием капиллярных и термодинамических сил, которые возникают в переменном электрическом поле [13].

Нагрев токами высокой частоты формовочного песка с целью снижения абсорбционной влажности предлагается в работе [14]. Для практического использования способа разработано водонепроницаемое покрытие песка с силикатонатриевым связующим.

Для сокращения времени упрочнения жидкостекольных смесей путем ускорения испарения воды из связующего, улучшения фильтрации паров воды через пористую смесь предлагается использовать вакуумирование форм и стержней. Однако интенсивное вакуумирование жидкостекольной смеси приводит к разупрочнению стержней и форм, так как перед испарением вода в жидком стекле вследствие эндотермического эффекта замерзает и жидкое стекло теряет свои связующие свойства [15].

Авторы работы [16] предлагают газ-отвердитель перед пропуском через смесь предварительно нагреть до температуры 60–180 °С. Отбор газа проводят вакуумированием при разрежении от 0,02 до 0,065 МПа. Совместное действие предварительно нагретого газа и вакуумирования обеспечивает их оптимальное взаимное влияние на повышение эффективности отверждения жидкостекольной смеси. Скорость подвода газа-отвердителя и его движения по объему стержня замедляется из-за возникновения повышенного давления при испарении влаги из связующего и уменьшения газопроницаемости смеси вследствие конденсации паров воды в холодных удаленных от места подвода нагретого газа-отвердителя слоях формы. Скорость удаления воды из связующего зависит от режима вакуумирования, при малом разрежении эндотермический эффект не оказывает заметного влияния на процесс испарения воды из жидкостекольного связующего. При высоком разрежении происходит разупрочнение смеси за счет разрушения образующихся коагуляционных структур в связующем при его вспенивании или замерзании под действием вакуума.

Предварительный подогрев газа-отвердителя компенсирует захлаживающее действие вакуумирования, устраняет конденсацию образующихся при нагреве смеси паров. С увеличением степени разрежения температуру нагрева газа-отвердителя необходимо увеличивать, однако при температурах выше 180° С происходит карбонизация и охрупчивание пленок жидкостекольного связующего, снижается прочность стержней и увеличивается их осыпаемость. При увеличении разрежения более 0,065 МПа превалирующим в процессах испарения связующего из смесей становится теплопередача на границе раздела пленок жидкого связующего и газовой фазы, возникает опасность вакуумной эрозии поверхностного слоя формируемого стержня за счет разрыва межзерновых связей.

При температурах нагрева газа меньше 60° С преобладающим процессом в упрочнении жидкостекольной смеси является химическое отверждение связующего, время отверждения смеси даже при высоком разрежении примерно в 2 раза больше, прочность смеси после полного отверждения на 30–50% ниже.

В США, Англии и Японии при использовании жидкостекольных смесей применяют комбинацию химического упрочнения углекислым газом и вакуумирования.

Фирма «Sinto» предлагает VRH-процесс, в котором формирование прочности обеспечивается продувкой углекислым газом, упрочнением при дегидратации при низком давлении либо комбинацией этих двух приемов.

На первой стадии отверждения опоку с уплотненной смесью помещают в камеру вакуумного отверждения. Понижение давления обеспечивает переход влаги в силикат натрия, удаление влаги способствует образованию оболочек силикатного геля вокруг песчинок смеси.

Далее вакуум заменяют углекислым газом, при отсутствии воздуха и других газов реакция с силикатом натрия происходит достаточно быстро.

Количество используемого жидкого стекла уменьшается до 2–3%, углекислого газа – с 6 до 0,3–1,0%. За счет более низкого содержания жидкого стекла происходит улучшение выбиваемости смеси, повышение точности отливок, улучшается регенерируемость смеси.

Способ комбинированного упрочнения стержней с неактивным феррохромовым шлаком предложен в работе [16], формируемый стержень кратковременно и интенсивно продувается нагретым до 100 °С разбавленным углекислым газом (50% CO₂ + 50% сжатого воздуха), а затем доупрочняется в оснастке за счет воздействия феррохромового шлака. Продувка нагретым разбавленным углекислым газом интенсифицирует процесс взаимодействия жидкого стекла с двухкальциевым силикатом и обеспечивает быстрое и равномерное отверждение стержней по всему объему. В зависимости от сложности конфигурации стержней, требований к их качеству предложены различные варианты способа в комбинации с вакуумированием. Вспучивание пленок зависит от скорости нагрева. У образцов после обработки углекислым газом при медленном нагреве вспучивание пленок не наблюдается, пленки, обработанные углекислым газом, по своей структуре более рыхлые и пористые.

Для реализации различных способов комбинированного упрочнения необходимо детальное теоретическое обоснование предлагаемых решений и проведение экспериментальных исследований с целью определения оптимальных технологических параметров процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Васин Ю. П.** Смесей для изготовления стержней по нагреваемой и ненагреваемой оснастке / Ю. П. Васин, З. Я. Иткис. Челябинск: ЧПИ, 1977. 35 с.
2. **Жуковский С. С.** Формовочные материалы и технологии литейной формы: Справ. / С. С. Жуковский, Г. А. Анисович, Н. И. Давидов и др. М.: Машиностроение, 1993. 432 с.
3. **Жуковский С. С.** Смесей холодного отверждения для крупносерийного и массового производства / С. С. Жуковский // Литейное производство. 1974. № 1. С. 1–3.
4. **Белобров Е. А.** Отверждение жидкостекольных смесей разбавленным углекислым газом / Е. А. Белобров, В. В. Чернявский, В. Г. Вдовенко и др. // Литейное производство. 1987. № 2. С. 14–16.
5. **Семик А. П.** Специальные формовочные смеси с регулируемыми технологическими свойствами / А. П. Семик, А. В. Степаненко, А. Э. Цветков // Литейное производство. 1996. № 2. С. 22.
6. **Исаев Г. А.** Современные жидкостекольные смеси для форм и стержней / Г. А. Исаев // Литейное производство. 2004. № 2. С. 16.
7. **Иткис З. Я.** Изготовление стержней из жидкостекольной смеси в нагреваемой оснастке / З. Я. Иткис, М. В. Никифорова, А. П. Никифорова и др. // Литейное производство. 1995. № 4. С. 37.
8. **Иткис З. Я.** Повышение скорости отверждения жидкостекольных смесей в нагреваемой оснастке / З. Я. Иткис, М. В. Никифорова // Теория и технология литейного производства: сб. науч. тр. Челябинск: ЧГТУ, 1996. С. 114–118.
9. **Иткис З. Я.** Формирование прочности жидкостекольных смесей при нагреве / З. Я. Иткис, М. В. Никифорова // Теория и технология литейного производства: сб. науч. тр. Челябинск: ЧГТУ, 1996. С. 107–113.
10. **Маслов К. А.** Пути повышения технологичности жидкостекольных смесей / К. А. Маслов, И. О. Леушин, А. Е. Мироничев // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. № 2. С. 8–11.
11. **Маслов К. А.** К вопросу о методах повышения технологичности жидкостекольных смесей / К. А. Маслов, И. О. Леушин, С. В. Плохое // Литейщик России. 2010. № 2. С. 26–29.
12. **Маслов К. А.** Теоретические аспекты некоторых методов повышения технологичности жидкостекольных стержневых смесей, отверждаемых по CO₂-процессу / К. А. Маслов, И. О. Леушин, А. Ю. Субботин // Литейщик России. 2010. № 6. С. 36–38.
13. **Лыков А. В.** Теория сушки / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 315 с.
14. **Jina W., Zitian F., Xiaolei Z., and oth.** Properties of sodium silicate bonded sand hardened by microwave heating // China Foundry. 2009. № 3 P. 191–195.

15. **Восковец В. Г.** Вакуумная сушка жидкостекольных смесей / В. Г. Восковец, О. Н. Литвиненко // Вестн. Харьк. политехн. ин-та, № 182. Прогрессивная технология литейного производства. Харьков: Вища шк., 1981. Вып. 8. С. 45- 47.
16. **Бегма В. А.** Разработка и внедрение технологии изготовления стержней из смесей на высокомодульном жидкостекольном связующем: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Курган, 2001.

REFERENCES

1. **Vasin Yu. P., Itkis Z. Ya.** *Smesi dlya izgotovleniya sterzhnej po nagrevaemoj i nenagrevaemoj osnastke* [Mixtures for the production of rods on the heated and non-heated equipment]. Chelyabinsk, ChPI Publ., 1977. 35 p.
2. **Zhukovskij S. S., Anisovich G. A., Davidov N. I. and oth.** *Formovochnye materialy i texnologii litejnoj formy: Spravochnik* [Molding materials and mold technology: A Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 432 p.
3. **Zhukovskij S. S.** Smesi kholodnogo otverzhdeniya dlya krupnoseriynogo i massovogo proizvodstva [Cold cure mixtures for large batch and mass production]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 1974, no. 1, pp. 1–3.
4. **Belobrov E. A., Chrnyavskij V. V., Vdovenko V. G. and oth.** Otverzhdenie zhidkostekol'nykh smesey razbavlenym uglekislym gazom [Hardening liquid-glass mixtures with dilute carbon dioxide]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 1987, no. 2, pp. 14–16.
5. **Semik A. P., Stepanenko A. V., Cvetkov A. E.** Special'nye formovochnye smesi s reguliruemymi texnologicheskimi svojstvami [Special molding mixtures with adjustable technological properties]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 1996, no. 2, pp. 22.
6. **Isaev G. A.** Sovremennye zhidkostekol'nye smesi dlya form i sterzhnej [Modern liquid-glass mixtures for molds and rods]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2004, no. 2, pp. 16.
7. **Itkis Z. Ya., Nikiforova M. V., Nikiforova A. P.** Izgotovlenie sterzhnej iz zhidkostekol'noj smesi v nagrevaemoj osnastke [Production of rods from the liquid-glass mixture in a heated equipment]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 1995, no. 4, pp. 37.
8. **Itkis Z. Ya., Nikiforova M. V.** Povyshenie skorosti otverzhdeniya zhidkostekol'nykh smesey v nagrevaemoj osnastke [Increase the speed of hardening liquid-glass mixtures in a heated equipment]. Chelyabinsk, ChGTU Publ., 1996, pp. 114–118.
9. **Itkis Z. Ya., Nikiforova M. V.** *Formirovanie prochnosti zhidkostekol'nykh smesey pri nagreve* [The formation of the strength of liquid-glass mixtures during heating]. Chelyabinsk, ChGTU Publ., 1996, pp. 107–113.
10. **Maslov K. A., Leushin I. O., Mironychev A. E.** Puti povysheniya texnologichnosti zhidkostekol'nykh smesey [Ways to improve the processability of liquid-glass mixtures]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii = Blank production in machine-building industry*, 2010, no. 2, pp. 8–11.
11. **Maslov K. A., Leushin I. O., Plokhoe S. V.** K voprosu o metodax povysheniya texnologichnosti zhidkostekol'nykh smesey [The question of how to improve the manufacturability of liquid mixtures]. *Litejshhik Rossii = Russian Foundryman*, 2010, no. 2, pp. 26–29.
12. **Maslov K. A., Leushin I. O., Subbotin A. Yu.** Teoreticheskie aspekty nekotorykh metodov povysheniya tekhnologichnosti zhidkostekol'nykh sterzhnevnykh smesey, otverzhdaemykh po SO₂-processu [Theoretical aspects of some methods for improving the processability of liquid-glass CO₂-curable core mixtures]. *Litejshhik Rossii = Russian Foundryman*, 2010, no. 6, pp. 36–38.
13. **Lykov A. V.** *Teoriya sushki* [Drying theory]. Moscow, E'nergiya Publ., 1968. 315 p.
14. **Jina W., Zitian F., Xiaolei Z. and oth.** Properties of sodium silicate bonded sand hardened by microwave heating. *China Foundry*, 2009, no. 3, pp. 191–195.
15. **Voskovec V. G., Litvinenko O. N.** Vakuumnaya sushka zhidkostekol'nykh smesey [Vacuum drying of liquid-glass mixtures]. Vestnik Khar'kovskogo politekhnicheskogo instituta, no. 182. Progressivnaya tekhnologiya litejnogo proizvodstva, no. 8. Khar'kov, Vishha shkola Publ., 1981, pp. 45–47.
16. **Begma V. A.** *Razrabotka i vnedrenie texnologii izgotovleniya sterzhnej iz smesey na vysokomodul'nom zhidkostekol'nom svyazuyushhem* [Development and implementation of the technology of manufacturing rods from mixtures of a high-modular liquid glass binder]. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Abstract of dissertation for the degree of Ph. D. In Engineering]. Kurgan, 2001.