

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.74

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-31-39



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗМЕЛЬЧЁННЫХ ОТХОДОВ СИЛИКОНОВЫХ РЕЗИН В КАЧЕСТВЕ РАЗУПРОЧНЯЮЩЕЙ ДОБАВКИ ДЛЯ ЖИДКОСТЕКОВЫХ СТЕРЖНЕВЫХ СМЕСЕЙ ТЕПЛООВОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ

Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Субботин А.Ю., Титов А.В.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Актуальность исследования. В статье описан способ решения одной из актуальных проблем литейного производства – проблемы высокой остаточной прочности жидкостекловых смесей теплового отверждения. **Цель работы.** Практическим путём определить в составе смеси количество измельчённых отходов силиконовых резин, необходимое для её эффективного разупрочнения, и температурно-временной режим тепловой обработки стержней для снижения вероятности образования газовой пористости в отливках и сохранения на высоком уровне основных эксплуатационных свойств жидкостекловых литейных стержней. **Результаты исследования.** Путём проведения испытаний на стандартных образцах определён наилучший режим тепловой обработки жидкостекловых смесей, содержащих в своём составе измельчённые отходы силиконовых резин, состоящий из двух этапов. На первом этапе осуществляется нагрев стержней в сушильной печи при температуре 200°C в течение 15 мин. Второй этап включает в себя нагрев стержней в сушильной печи при температуре 400°C в течение 5,5 мин. Испытания также показали, что для получения наилучшего комплекса эксплуатационных свойств жидкостекловых стержней теплового отверждения для снижения остаточной прочности в смесь нужно добавлять от 2 до 4% (по массе) измельчённых отходов силиконовых резин. **Практическая значимость.** Введение в состав жидкостекловых смесей теплового отверждения измельчённых отходов силиконовых резин позволит изготавливать стержни, обладающие высокой прочностью, хорошей газопроницаемостью, низкой осыпаемостью и остаточной прочностью.

Ключевые слова: отходы производств, стержневая смесь, литейный стержень, жидкостекловая смесь, затруднённая выбиваемость, разупрочняющие добавки

© Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Субботин А.Ю., Титов А.В., 2025

Для цитирования

Использование измельчённых отходов силиконовых резин в качестве разупрочняющей добавки для жидкостекловых стержневых смесей теплового отверждения / Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Субботин А.Ю., Титов А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 31-39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-31-39>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

USING CRUSHED SILICONE RUBBER WASTE AS A SOFTENING ADDITIVE FOR LIQUID GLASS CORE MIXTURES OF HEAT-CURING

Leushin I.O., Vakhidov U.Sh., Subbotin A.Yu., Titov A.V.

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The article describes a solution to one of the urgent problems of foundry production – the problem of high residual strength of liquid glass mixtures of heat-curing. **Objectives.** The research is aimed at practically determining the amount of crushed silicone rubber (CSR) waste in the mixture composition required for its effective softening, and the temperature-time mode of heat treatment of the cores to reduce the likelihood of gas porosity in castings and maintain the main performance properties of liquid glass moulding cores at a high level. **Result.** By testing standard samples, the best mode of heat treatment of liquid glass mixtures containing CSR waste in their composition was determined, consisting of two stages. At the first stage, the cores are heated in a drying furnace at a temperature of 200°C for 15 minutes. The second stage includes heating the cores in a drying furnace at a temperature of 400°C for 5.5 minutes. The tests also showed that in order to obtain the best combination of operational properties of liquid glass cores of heat curing, it is necessary to add from 2 to 4% (by weight) of CSR waste to the mixture to reduce residual strength. **Practical Relevance.** The introduction of CSR waste into the composition of liquid glass heat-curing mixtures will allow the production of cores with high strength, good gas permeability, low crumbling and residual strength.

Keywords: production waste, core sand mixture, moulding core, liquid glass mixture, difficult breakdown, softening additives

For citation

Leushin I.O., Vakhidov U.Sh., Subbotin A.Yu., Titov A.V. Using Crushed Silicone Rubber Waste as a Softening Additive for Liquid Glass Core Mixtures of Heat-Curing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 31-39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-31-39>

Введение. Постановка проблемы

Прочность стержней и форм, изготовленных из жидкостекольных смесей, отверждаемых тепловой сушкой, приблизительно в 5-10 раз превышает прочность стержней из жидкостекольных смесей, отверждаемых продувкой углекислым газом [1]. Поэтому такие смеси применяются для изготовления массивных отливок, когда требуется, чтобы форма и стержни выдерживали большие механические нагрузки в процессе заливки формы и дальнейшего охлаждения отливки. Ещё одна область применения – изготовление средних и мелких отливок со стержнями, имеющими относительно тонкие сечения. В данном случае к стержневой смеси также предъявляется требование сохранять высокую прочность под воздействием усилий, возникающих во время усадки отливки.

Кроме высокой прочности, жидкостекольные смеси, отверждаемые тепловой сушкой, обладают относительно низкой осыпаемостью и хорошей газопроницаемостью. Главный недостаток таких смесей – высокая остаточная прочность и, как следствие, их затруднённая выбиваемость из отливок.

Для снижения остаточной прочности жидкостекольных смесей, отверждаемых тепловой сушкой, так же как и при использовании других способов отверждения, в их состав добавляют различные разупрочняющие компоненты [2, 3].

Например, известна смесь, содержащая 2,75–3,00 мас. % жидкостекольного связующего, 0,08–0,17 мас. %

фенолформальдегидной смолы ФСМ-1, 0,0003–0,003 мас. % сульфата алюминия (сухое вещество), 0,0027–0,027 мас. % воды технической и огнеупорный наполнитель на основе диоксида кремния [4]. После применения тепловой сушки стабилизируется живучесть смеси и улучшается её выбиваемость из отливок. Недостатком смеси является наличие в её составе фенолформальдегидной смолы, при деструкции которой во время заливки формы расплавом и в процессе остывания отливки в атмосферу цеха выделяется SO_2 и другие вредные для здоровья человека вещества.

В качестве ещё одного примера можно привести смесь, содержащую 3-4 мас. % огнеупорной глины, 6-7 мас. % жидкого стекла, 1-2 мас. % фильтропрессового осадка растительного горчичного масла и огнеупорный наполнитель на основе кремнезёма [5]. Добавка разбавленного водой фильтропрессового осадка растительного горчичного масла улучшает выбиваемость смеси из отливок. Однако при этом значительно увеличивается газотворность смеси и её осыпаемость, что повышает риск образования в отливках газовых дефектов, неметаллических включений и засоров.

Предлагаемое решение проблемы

В данной статье представлены результаты исследований, которые доказывают возможность использования измельчённых отходов силиконовых резин (ОСР) для разупрочнения жидкостекольных стержней, отверждённых тепловой сушкой. Эти отходы пред-

ставляют собой частицы силикона фракции 0,3-0,5 мм, полученные методом механического измельчения выведенных из эксплуатации силиконовых форм, использовавшихся для производства изделий из полиуретанов, искусственного декоративного камня и для литья низкотемпературных металлов и сплавов [6].

Ранее авторами статьи уже были разработаны составы жидкостекольных смесей, содержащих в качестве разупрочняющих компонентов добавки измельчённых ОСР [7, 8]. Промышленные испытания доказали их эффективность [9]. Однако эти составы рассчитаны для использования при отверждении смесей продувкой углекислым газом и дальнейшие исследования показали, что их нецелесообразно применять для изготовления жидкостекольных стержней, отверждаемых тепловой сушкой, по причине роста осыпаемости смеси и недостаточно высокого разупрочняющего эффекта. Оптимальная температура сушки жидкостекольных смесей составляет 200°C [10]. Температура начала деструкции поливинилового спирта равна 180°C [11]. Поэтому можно предположить, что причина роста осыпаемости смеси заключается в том, что эластичные плёнки поливинилового спирта, образованные на поверхности зёрен песка, в процессе нагрева смеси во время сушки разрушаются и поверхностный слой стержня частично разупрочняется.

Из литературных источников известно, что остаточная прочность жидкостекольных смесей, отверждаемых тепловой сушкой, выше остаточной прочности смесей, отверждаемых продувкой углекислым газом [12, 13]. Поэтому для эффективного разупрочнения смеси необходимо увеличить в её составе количество разупрочняющей добавки – измельчённых ОСР. Однако при этом растёт вероятность образования газовых дефектов в отливках и осыпаемости смеси.

Авторами данной статьи предлагается решение обозначенных проблем путём добавления в состав жидкостекольных смесей большего количества измельчённых ОСР и применения двухэтапного процесса тепловой обработки стержней.

На первом этапе стержень полностью отверждается при температуре 200°C. При этом частицы измельчённых отходов силиконовых резин не деструктируют (температура деструкции составляет 350°C), их деструкция происходит при прогреве стержня в процессе его заливки расплавом с образованием аморфного диоксида кремния и углекислого газа, разрушающего плёнки связующего на поверхности зёрен кварцевого песка.

На втором этапе осуществляется нагрев поверхности стержня до температуры 350°C. При данной температуре частицы измельчённых отходов силиконовых резин, находящиеся в поверхностном слое стержня, деструктируют с образованием углекислого газа и аморфного диоксида кремния. Таким образом, при дальнейшей заливке формы расплавом вероятность попадания газов в отливку из-за деструкции частиц измельчённых ОСР из более глубоких слоёв

стержня значительно снижается, поскольку на поверхности отливки успеет образоваться прочная корочка затвердевшего металла.

Известно, что температура нагрева жидкостекольных смесей выше 300°C приводит к снижению прочности стержней [14]. Поэтому второй этап тепловой обработки не должен быть слишком длительным. Необходимо, чтобы пониженная прочность поверхностного слоя стержня существенно не снижала его общей прочности.

Материалы, методы исследования, обсуждение результатов

В первой части практической работы были проведены исследования влияния различных режимов нагрева стандартных образцов на их основные эксплуатационные свойства.

Для приготовления смеси использовались следующие материалы: стекло натриевое жидкое с модулем 2,6, плотностью 1,47 г/см³ (ГОСТ 13078-81); песок кварцевый 2K₁O₂O₂ (ГОСТ 2138-91); глина формовочная ПЗ (ГОСТ 3226-93); измельчённые отходы силиконовых резин.

Стержневая смесь приготавливалась следующим образом. В смеситель модели 02113 загружали кварцевый песок, глину, измельчённые отходы силиконовых резин, предварительно подготовленные с помощью режущей мельницы модели Retsch SM100 (размер частиц составляет 0,5 мм), и перемешивали в течение 3 мин. Затем вводили в смесь жидкое стекло и перемешивали в течение 5 мин. Образцы изготавливались по стандартной методике.

Испытания образцов на прочность, газопроницаемость и осыпаемость проводились по ГОСТ 23409.7-78, ГОСТ 23409.6-78 и ГОСТ 23409.9-78 соответственно.

Для определения остаточной прочности образцы предварительно нагревали в печи до 800°C в течение 1 ч, затем охлаждали на воздухе до 20°C и далее испытывали по методике, определённой ГОСТ 23409.7-78. Таким образом осуществлялась имитация прогрева стержневой смеси при воздействии на неё тепла затвердевающего металла.

Для проведения испытаний использовалась стержневая смесь, содержащая 2,0% измельчённых ОСР (табл. 1, состав №1).

На первом этапе тепловой обработки образцы помещались в сушильную печь с воздушной атмосферой при температуре 200°C на 15 мин. Длительность первого этапа при проведении всех экспериментов оставалась неизменной. Данный температурный режим был выбран в качестве оптимального для достижения максимальной прочности смеси после её отверждения [10].

На втором этапе тепловой обработки образцы помещались в другую сушильную печь с более высокой температурой. Температура варьировалась от 350 до 500°C с шагом 50°C. Время выдержки образцов в

печи варьировалось от 1 до 10 мин с шагом 1 мин. Далее образцы извлекались из сушильного шкафа и охлаждались на воздухе до температуры 20°C. После извлечения образцов из печи на данном этапе они были покрыты белым налётом – тонким слоем аморфного диоксида кремния по причине деструкции

частиц силикона в поверхностном слое стержня. При этом чем выше температура нагрева и больше время выдержки, тем плотнее слой белого налёта. Для его удаления образцы обдували сжатым воздухом.

Результаты первой части практической работы показаны на **рис. 1**.

Таблица 1. Составы стержневых смесей, отверждаемых двухэтапной тепловой обработкой с добавкой измельчённых ОСР

Table 1. Compositions of core mixtures cured by two-stage heat treatment with the addition of CSR waste

Компоненты смеси	Состав смесей, мас. %							
	Базовая смесь	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
Жидкое стекло	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Формовочная глина	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Измельчённые отходы силиконовых резин (размер частиц 0,5 мм)	–	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Кварцевый песок	ост.	ост.	ост.	ост.	ост.	ост.	ост.	ост.

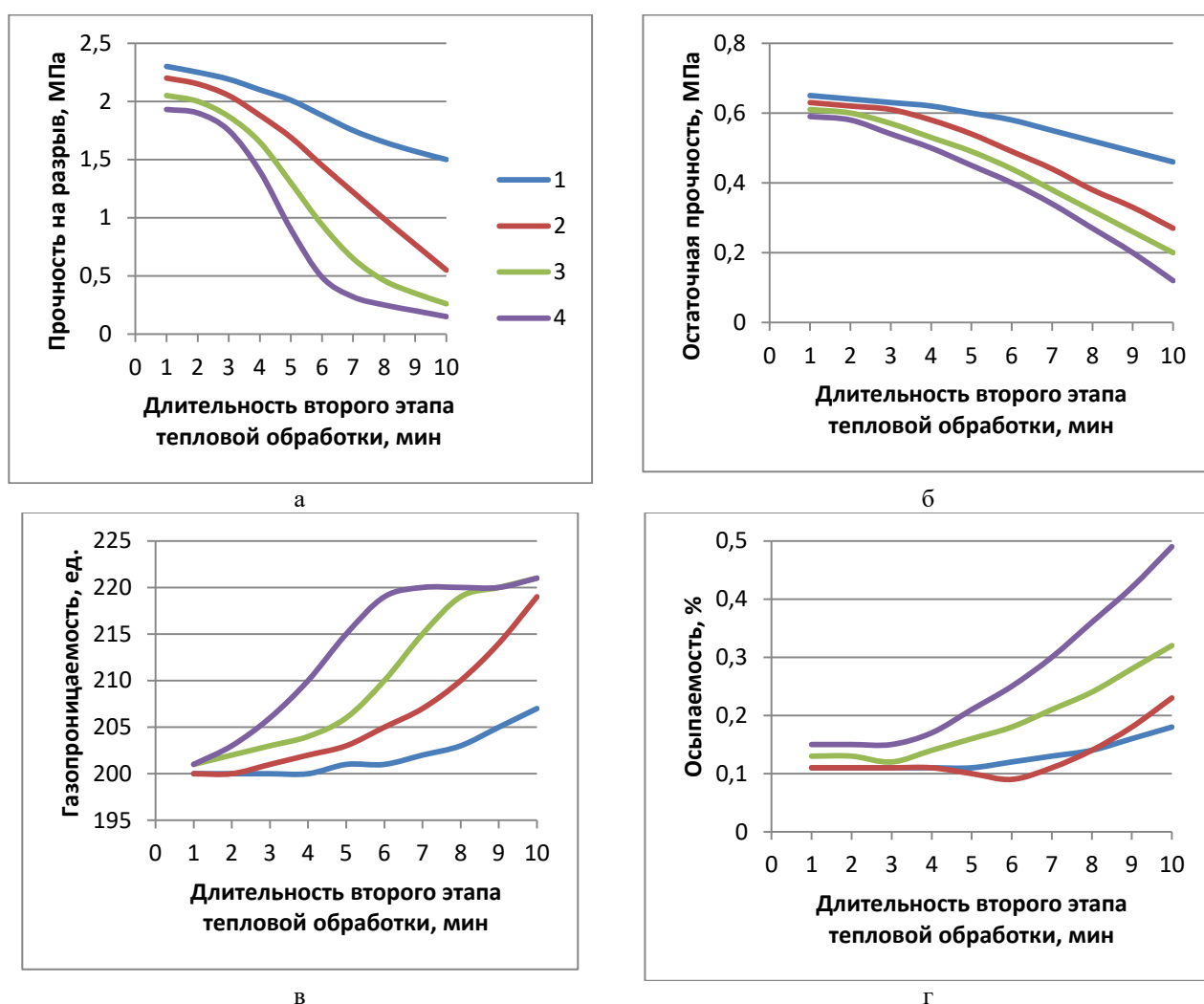


Рис. 1. Влияние температуры и длительности второго этапа тепловой обработки образцов на свойства смеси: 1 – при температуре в печи 350°C; 2 – при температуре в печи 400°C; 3 – при температуре в печи 450°C; 4 – при температуре в печи 500°C

Fig. 1. Influence of temperature and duration of the second stage of heat treatment of samples on the properties of the mixture: 1 is at a temperature in the furnace of 350°C; 2 is at a temperature in the furnace of 400°C; 3 is at a temperature in the furnace of 450°C; 4 is at a temperature in the furnace of 500°C

С ростом времени выдержки образцов в печи на втором этапе тепловой обработки их прочность на разрыв снижается (**рис. 1, а**). При использовании температуры в печи, равной 350°C, и длительности выдержки от 1 до 10 мин прочность уменьшается приблизительно в 1,5 раза. При использовании более высоких температур нагрева прочность снижается значительно быстрее и в большее количество раз. Так, при температуре 400°C прочность уменьшается в 4 раза, при температуре 450°C – в 7,9 раза, при температуре 500°C – в 12,9 раза. Причиной такого существенного падения прочности является то, что разупрочняющая добавка (измельчённые ОСР) «срабатывает» уже на втором этапе тепловой обработки. При этом чем выше температура в печи, тем на большую глубину прогревается образец до температуры «срабатывания» добавки (350°C) и тем больший слой на поверхности образца разупрочняется.

С увеличением температуры тепловой обработки временной интервал наибольшего снижения прочности смещается в сторону меньших значений (влево на **рис.1, а**). Так, при температуре в печи, равной 450°C, наибольшее падение прочности наблюдается во временном интервале от 5 до 8 мин, а при температуре 500°C – в температурном интервале от 4 до 6 мин. Наиболее вероятной причиной этого является то, что при данных температурах именно в этих временных интервалах происходит разупрочнение смеси за счёт деструкции частиц измельчённых ОСР. При дальнейшем увеличении длительности выдержки образцов в печи скорость падения прочности снижается.

С увеличением длительности второго этапа тепловой обработки с 1 до 10 мин остаточная прочность снижается (**рис. 1, б**). При температуре в печи, равной 350°C, этот процесс, вероятно, происходит в основном за счёт того, что ещё на стадии второго этапа сушки в некоторой части связующего – дегидратированного силиката натрия – в процессе усадки появляются трещины, ослабляющие связь между песчинками огнеупорного наполнителя. При этом частицы измельчённых ОСР деструктируют только в небольшом по толщине поверхностном слое образца. Их влияние на снижение остаточной прочности проявляется в полной мере только после повторного нагрева образцов до 800°C при проведении испытаний на остаточную прочность.

При температуре в печи, равной 400°C и выше, снижение остаточной прочности происходит быстрее, особенно при увеличении длительности нагрева. Это объясняется тем, что деструкция частиц разупрочняющей добавки происходит уже во время второго этапа тепловой обработки. При этом чем длительней нагрев, тем большей толщины поверхностный слой прогревается до температуры 350°C, что обеспечивает более сильное разупрочнение за счёт деструкции большего количества частиц измельчённых ОСР. Таким образом, образцы перед проведением испытаний

на остаточную прочность уже обладают малой прочностью. После повторного нагрева до 800°C и остывания образцов эффект разупрочнения усиливается.

С увеличением длительности выдержки образцов в печи на втором этапе тепловой обработки газопроницаемость возрастает (**рис. 1, в**). При использовании температуры нагрева 350°C скорость роста газопроницаемости с увеличением времени обработки невелика. Это можно объяснить тем, что повышение газопроницаемости происходит в основном за счёт роста количества трещин в связующем, образующихся из-за повышения термических напряжений в процессе его усадки.

При температуре в печи, равной 400°C, газопроницаемость с увеличением времени тепловой обработки растёт быстрее, особенно во временном диапазоне от 7 до 10 мин (газопроницаемость возрастает от 207 до 219 ед.). В данном случае это связано не только с увеличением числа микротрещин в связующем, образованных по причине его усадки, но и с тем, что часть образца прогревается до температуры 350°C и выше. Некоторая доля частиц измельчённых ОСР, содержащихся в смеси, деструктирует, под давлением выделяющихся при этом газов увеличивается количество трещин в связующем. Кроме того, в пространстве, изначально занятом частицами силикона, образуются поры, также способствующие росту газопроницаемости смеси.

При температуре в печи, равной 450°C, наблюдается рост газопроницаемости приблизительно с такой же скоростью, как и в случае нагрева образцов в печи с температурой 400°C. Однако рост газопроницаемости начинается раньше – во временном диапазоне от 5 до 8 мин. Далее скорость роста газопроницаемости значительно замедляется. Это можно объяснить тем, что при выдержке образцов в печи более 8 мин при температуре 450°C они полностью прогреваются до температуры 350°C и выше. Таким образом, при дальнейшей выдержке образцов в печи газопроницаемость может расти лишь за счёт увеличения количества трещин в связующем, а этот процесс на данном этапе протекает уже значительно медленнее.

При температуре в печи, равной 500°C, кривая роста газопроницаемости ещё сильнее смещена влево, поскольку процесс прогрева смеси происходит быстрее, что способствует более раннему началу роста газопроницаемости.

Осыпаемость стержней напрямую зависит от их поверхностной прочности. С ростом температуры обработки и с увеличением времени выдержки в печи поверхностная прочность, так же как и общая прочность образцов, снижается, что приводит к росту осыпаемости (**рис. 1, г**).

Для стержневых жидкостекольных смесей, содержащих измельчённые ОСР, на снижение массы образцов при проведении испытаний на осыпаемость оказывают влияние два основных фактора: удаление

частиц силикона, плохо смачивающихся жидким стеклом, из поверхностного слоя стержня и потеря частиц кварцевого песка, недостаточно прочно связанных с другими песчинками посредством связующего материала. Второй этап тепловой обработки необходим для того, чтобы заранее удалить из поверхностного слоя стержня частицы ОСР и тем самым снизить влияние первого фактора.

На рис. 1, г видно, что при увеличении длительности второго этапа тепловой обработки при температуре в печи 400 и 450°C наблюдается некоторое снижение осыпаемости при значениях времени выдержки, равных 6 и 3 мин соответственно. Причиной такого эффекта можно считать доминирующее воздействие первого из указанных выше факторов. При увеличении выдержки образцов в печи главную роль начинает играть второй фактор, и осыпаемость растёт. При температуре в печи, равной 350°C, снижения осыпаемости не происходит, вероятно, по причине того, что образцы за всё время проведения эксперимента (10 мин) не успевают прогреться настолько, чтобы этот эффект был замечен. При температуре в печи, равной 500°C, и выдержках времени до 3 мин осыпаемость практически не изменяется. Причиной этого может быть то, что снижение осыпаемости за счёт предварительного удаления частиц силикона с поверхности образца полностью компенсируется ростом осыпаемости за счёт потери частиц песка из-за снижения прочности связующего материала. При увеличении длительности выдержки образцов в печи их осыпаемость растёт.

Задача второго этапа тепловой обработки заключается в том, чтобы частицы силикона, расположенные в поверхностном слое стержня, разрушили, что при дальнейшем использовании стержней гарантировало бы невозможность образования газовых дефектов в отливках из-за наличия в смеси измельчённых ОСР. При этом температурно-временной режим обработки должен быть таким, чтобы общая прочность стержня оставалась на высоком уровне, а остаточная прочность и осыпаемость, наоборот, на низком.

Как уже было сказано выше, одним из главных преимуществ жидкостекольных стержневых смесей, отверждаемых тепловой обработкой, является их высокая прочность. Поэтому при выборе температурно-временного режима второго этапа тепловой обработки в качестве главного критерия оценки было выбрано условие, чтобы прочность на разрыв была не ниже 1,5 МПа. При этом осыпаемость не должна превышать 0,2%, а остаточная прочность быть ниже 0,5 МПа. Газопроницаемость в качестве критерия оценки не учитывалась, поскольку даже при минимальном времени выдержки образцов в печи её значение было вполне удовлетворительным (200 ед.) и при увеличении длительности нагрева образцов газопроницаемость только возрастала.

Прочности на разрыв, равной 1,5 МПа, и двум другим перечисленным критериям соответствуют следующие режимы тепловой обработки:

1. Температура в печи – 350°C, длительность нагрева образцов – 10 мин.
2. Температура в печи – 400°C, длительность нагрева образцов – 5,5 мин.
3. Температура в печи – 450°C, длительность нагрева образцов – 4,5 мин.
4. Температура в печи – 500°C, длительность нагрева образцов – 3,5 мин.

Остаточная прочность образцов при всех перечисленных режимах тепловой обработки приблизительно одинакова и находится на уровне 0,5 МПа. При этом наименьшей осыпаемостью обладают образцы, обработанные по второму режиму.

Таким образом, для дальнейших исследований был выбран следующий температурно-временной режим второго этапа тепловой обработки образцов: температура в печи – 400°C, длительность выдержки образцов – 5,5 мин.

Во второй части практической работы были проведены исследования влияния различных количеств измельчённых ОСР в составе жидкостекольной смеси на основные эксплуатационные свойства стандартных образцов, изготовленных по описанной выше методике и отверждённых с помощью двухэтапного процесса тепловой обработки. Первый этап – нагрев образцов при температуре в печи 200°C в течение 15 мин, второй этап – нагрев образцов при температуре в печи 400°C в течение 5,5 мин.

При проведении исследований использовались семь составов смесей, в которых варьировалось только содержание измельчённых ОСР, и базовая смесь без добавки измельчённых ОСР (см. табл. 1). Для отверждения базовой смеси применялся только первый этап тепловой обработки. Для оценки влияния добавления в состав базовой смеси различных количеств разупрочняющей добавки – измельчённых ОСР – на появление газовой пористости была изготовлена пробная партия отливок из сплава АК7ч.

Результаты исследований (табл. 2) показали, что с ростом содержания измельчённых ОСР в составе смесей их прочность на разрыв снижается в 1,5–1,7 раза по сравнению с базовой смесью, однако уровень прочности остаётся высоким (в среднем 1,5 МПа). При этом остаточная прочность образцов при добавлении в базовую смесь 2% измельчённых ОСР снижается в 5,4 раза. С увеличением количества разупрочняющей добавки до 5% остаточная прочность снижается ещё в 2,3 раза.

С повышением количества измельчённых ОСР в смеси её газопроницаемость незначительно увеличивается. Вероятно, это связано с тем, что растёт пористость поверхностного слоя образца при проведении второго этапа тепловой обработки.

Таблица 2. Характеристики стержневых смесей с добавкой измельчённых ОСР после их отверждения двухэтапной тепловой обработкой

Table 2. Characteristics of core mixtures with the addition of CSR waste after their curing by two-stage heat treatment

Характеристики смесей	Исследуемая смесь							
	Базовая смесь	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
Предел прочности на разрыв в отверждённом состоянии, МПа	2,4	1,57	1,56	1,54	1,52	1,50	1,47	1,43
Газопроницаемость, ед.	203	204	204	205	205	205	206	206
Осыпаемость, %	0,10	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,18	0,20
Остаточная прочность после проковки образцов при температуре 800°С, МПа	2,8	0,52	0,48	0,44	0,39	0,34	0,29	0,23
Газовая пористость в отливке	нет	нет	нет	нет	нет	нет	есть	есть

Осыпаемость смеси, содержащей 2% измельчённых ОСР, увеличивается 1,4 раза по сравнению с базовой смесью. При дальнейшем повышении содержания измельчённых ОСР в смеси осыпаемость продолжает расти, но с меньшей скоростью.

Качество поверхности (шероховатость) полостей в отливках, оформляемых стержнями, заметно снижается при содержании ОСР в смеси в количестве 4,5% и выше. При этом в отливках также появляется пористость (см. табл. 2, составы №6 и 7).

Выводы

Проведённые экспериментальные работы показали, что при добавлении в состав жидкостекольной стержневой смеси от 2 до 4% измельчённых ОСР и применении двухэтапного процесса тепловой обработки удаётся значительно снизить остаточную прочность, сохранив при этом на высоком уровне другие эксплуатационные характеристики смеси.

Качество поверхности стержней, а соответственно, и качество поверхности отливок можно повысить путём применения различных стержневых красок, поскольку ОСР инертны ко многим материалам, используемым для их приготовления.

Деструкция частиц измельчённых ОСР в поверхностном слое стержня на втором этапе тепловой обработки приводит к увеличению его пористости, что, в свою очередь, может улучшить податливость стержня. С другой стороны, по той же причине на поверхности отливок может образоваться дефект – механический пригар. Проверка высказанных предположений, особенно в отношении литья высокотемпературных сплавов, требует проведения дополнительных исследований.

Список источников

1. Лясс А.М. Быстротвердеющие формовочные смеси. М.: Машиностроение, 1965. 329 с.
2. Берг П.П. Формовочные материалы. М.: Машгиз, 1963. 408 с.

3. Бречко А.А., Великанов Г.Ф. Формовочные и стержневые смеси с заданными свойствами. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. 216 с.
4. Пат. 2151018 Российская Федерация, МПК В22С 1/02. Смесь для изготовления литейных форм и стержней (варианты) / В.Г. Гурлев, В.А. Смолко, Ю.С. Дворяшина, Б.Н. Виноградов, В.В. Пакулев; заявитель и патентообладатель Южно-Уральский государственный университет. № 99113003/02; заявл. 21.06.1999; опубл. 20.06.1999.
5. Пат. 2472598 Российская Федерация, МПК В22С 1/00. Смесь для изготовления литейных форм и стержней / Н.А. Кидалов, Н.А. Осипова, Д.В. Шумихин, И.Е. Поташова, Д.О. Алиев, И.В. Киселев; патентообладатель: ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ). №2011134128/02; заявл. 12.08.2011; опубл. 20.01.2013.
6. Оценка возможности применения измельчённых отходов силиконовых резин в качестве разупрочняющей добавки для жидкостекольных стержневых смесей / И.О. Леушин, А.В. Титов, С.Р. Ракитин // Литейное производство. 2023. №1. С. 18–22.
7. Пат. 2793659 Российская Федерация, МПК В22С 1/10, 1/18. Смесь для изготовления литейных форм и стержней / И.О. Леушин, А.В. Титов, С.Р. Ракитин; патентообладатель: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ). №2022132436; заявл. 12.12.2022; опубл. 04.04.2023.
8. Пат. 2813028 Российская Федерация, МПК В22С 1/10, 1/18. Смесь для изготовления литейных форм и стержней и способ её приготовления / И.О. Леушин, А.В. Титов, С.Р. Ракитин; патентообладатель: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ). №2023131183; заявл. 29.11.2023; опубл. 06.02.2024.
9. Леушин И.О., Титов А.В., Ракитин С.Р. Практические испытания легковывиваемой стержневой смеси, содержащей измельчённые отходы силиконовых резин // Литейное производство. 2024. №1. С. 20–23.
10. Изготовление отливок с применением быстротвердеющих смесей на жидком стекле // Конспекты до-

кладов научно-производственной конференции / под ред. А.М. Лясса. М., 1958. 470 с.

11. ГОСТ 10779-78. Спирт поливиниловый. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1978. 23 с.
12. Жуковский С.С. Прочность литейной формы. М.: Машиностроение, 1989. 288 с.
13. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия: справочник / А.Н. Болдин, Н.И. Давыдов, С.С. Жуковский и др. М.: Машиностроение, 2006. 507 с.
14. Формовочные материалы и технология литейной формы: справочник / С.С. Жуковский, Г.А. Анисович, Н.И. Давыдов и др. М.: Машиностроение, 1993. 432 с.

References

1. Lyass A.M. *Bystrotverdeyushchie formovochnye smesi* [Fast-hardening molding mixtures]. Moscow: Mashinostroenie, 1965, 329 p. (In Russ.)
2. Berg P.P. *Formovochnye materialy* [Molding materials]. Moscow: Mashgiz, 1963, 408 p. (In Russ.)
3. Brechko A.A., Velikanov G.F. *Formovochnye i sterzhnevye smesi s zadannymi svoystvami* [Molding and core mixtures with specified properties]. Leningrad: Mashinostroenie, Leningrad Branch, 1982, 216 p. (In Russ.)
4. Gurlev V.G., Smolko V.A., Dvoryashina Yu.S., Vinogradov B.N., Pakulev V.V. *Smes dlya izgotovleniya liteinykh form i sterzhney (varianty)* [Mixture for the manufacture of casting molds and cores (variants)]. Patent RU, no. 2151018, 1999.
5. Kidalov N.A., Osipova N.A., Shumikhin D.V., Potashova I.E., Aliev D.O., Kiselev I.V. *Smes dlya izgotovleniya liteinykh form i sterzhney* [Mixture for the production of casting molds and cores]. Patent RU, no. 2472598, 2013.
6. Leushin I.O., Titov A.V., Rakitin S.R. Evaluation of the possibility of using crushed silicone rubber waste as a softening additive for liquid glass core mixtures. *Liteinoe*

proizvodstvo [Foundry production]. 2023;(1):18-22. (In Russ.)

7. Leushin I.O., Titov A.V., Rakitin S.R. *Smes dlya izgotovleniya liteinykh form i sterzhney* [Mixture for the manufacture of casting molds and cores]. Patent RU, no. 2793659, 2023.
8. Leushin I.O., Titov A.V., Rakitin S.R. *Smes dlya izgotovleniya liteinykh form i sterzhney i sposob eyo prigotovleniya* [Mixture for the manufacture of casting molds and cores and the method for its preparation]. Patent RU, no. 2813028, 2024.
9. Leushin I.O., Titov A.V., Rakitin S.R. Practical tests of an easily knocked-out core mixture containing crushed silicone rubber waste. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry production]. 2024;(1):20-23. (In Russ.)
10. Lyass A.M. Manufacturing of castings using quick-hardening mixtures on liquid glass. *Konspekty dokladov nauchno-proizvodstvennoy konferentsii* [Abstracts of reports of the scientific and production conference]. Moscow, 1958, 470 p. (In Russ.)
11. State standard GOST 10779-78. Polyvinyl alcohol. Specifications. Moscow: Standards Publishing House, 1978, 23 p. (In Russ.)
12. Zhukovsky S.S. *Prochnost liteinoy formy* [Strength of the casting mold]. Moscow: Mechanical engineering, 1989, 288 p. (In Russ.)
13. Boldin A.N., Davydov N.I., Zhukovsky S.S. et al. *Liteinye formovochnye materialy. Formovochnye, sterzhnevye smesi i pokrytiya: spravochnik* [Foundry molding materials. Molding, core mixtures and coatings: reference book]. Moscow: Mechanical Engineering, 2006, 507 p. (In Russ.)
14. Zhukovsky S.S., Anisovich G.A., Davydov N.I. et al. *Formovochnye materialy i tekhnologiya liteinoy formy: spravochnik* [Molding materials and casting mold technology: reference book]. Moscow: Mechanical Engineering, 1993, 432 p. (In Russ.)

Поступила 27.05.2025; принята к публикации 04.07.2025; опубликована 25.12.2025

Submitted 27/05/2025; revised 04/07/2025; published 25/12/2025

Леушин Игорь Олегович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлургические технологии и оборудование», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
E-mail: igoleu@yandex.ru

Вахидов Умар Шахидович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
E-mail: umar-vahidov@mail.ru

Субботин Андрей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология электрохимических производств и химия органических веществ», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
E-mail: an_s_temp@mail.ru

Титов Андрей Вячеславович – старший преподаватель кафедры «Металлургические технологии и оборудование», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
E-mail: andavt95@rambler.ru

Igor O. Leushin – DrSc(Eng.), Professor, Head of the Department of Metallurgical Technologies and Equipment, Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
E-mail: igoleu@yandex.ru

Umar Sh. Vakhidov – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Construction and Road Machines, Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
E-mail: umar-vahidov@mail.ru

Andrey Yu. Subbotin – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology of Electrochemical Production and Chemistry of Organic Substances, Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
E-mail: an_s_temp@mail.ru

Andrey V. Titov – Senior Lecturer of the Department of Metallurgical Technologies and Equipment, Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
E-mail: andavt95@rambler.ru