



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-41-48>
УДК 621.743.42

Поступила 07.07.2023
Received 07.07.2023

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ПЕСЧАНО-ЖИДКОСТЕКОВЫХ ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ СЖАТИИ

Ю. И. ГУТЬКО, В. В. ВОЙТЕНКО, Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск, Луганская Народная Республика, Россия, кв. Молодежный, 20-а. E-mail: iuriigutko@yandex.ru

Песчаные литейные стержни на органических связующих веществах обладают требуемыми пределами прочности при растяжении, сжатии и изгибе, а также превосходной выбиваемостью из отливок. Однако повышение требований к экологичности литейного производства привело к возобновлению интереса к песчаным литейным стержням на неорганических связующих веществах, в том числе к песчано-жидкостекляной стержневой технологии. Песчано-жидкостекляные литейные стержни существенно уступают песчаным литейным стержням на органических связующих веществах по выбиваемости из отливок. Это связано с необходимостью использования достаточно большой массовой доли натриевого жидкого стекла для достижения требуемых пределов прочности песчано-жидкостекляных литейных стержней при растяжении, сжатии и изгибе, что сопровождается ухудшением выбиваемости таких литейных стержней из отливок. Проведены экспериментальные исследования, направленные на подбор рецептуры песчано-жидкостекляной стержневой смеси, обеспечивающей необходимый предел прочности песчано-жидкостекляных литейных стержней при сжатии в сочетании с улучшенной выбиваемостью из отливок. Приведены результаты экспериментальных исследований разрушения песчано-жидкостекляных литейных стержней при сжатии, показывающие возможность достижения требуемого предела прочности при сжатии и хорошей выбиваемости литейных стержней из отливок. Рассматриваются способы повышения прочности песчано-жидкостекляных литейных стержней в местах контакта со стержневыми замками, усиления наиболее подверженных нагрузкам участков литейных стержней и снижения предела их прочности при сжатии путем уменьшения массовой доли натриевого жидкого стекла, тем самым улучшая выбиваемость литейных стержней из отливок. Обсуждаются результаты испытаний песчано-жидкостекляных литейных стержней исследуемой рецептуры на прочность при сжатии, а также влияние на предел прочности при сжатии добавления в рецептуру оборотной стержневой смеси. Показано влияние неоднородностей песчано-жидкостекляного литейного стержня на предел его прочности при сжатии и получены математические выражения для расчета вероятности разрушения литейного стержня, содержащего неоднородность.

Ключевые слова. Песчано-жидкостеклянный литейный стержень, стержневая смесь, испытание на прочность, предел прочности при сжатии, выбиваемость из отливок.

Для цитирования. Гутько, Ю. И. Исследование разрушения песчано-жидкостекляных литейных стержней при сжатии / Ю. И. Гутько, В. В. Войтенко // Литье и металлургия. 2023. № 3. С. 41–48. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-41-48>.

DESTRUCTION INVESTIGATION OF FOUNDRY SAND-LIQUID-GLASS CORES UNDER COMPRESSION

Yu. I. GUTKO, V. V. VOYTENKO, Luhansk State University named after V. Dahl, Luhansk, Luhansk People's Republic, Russia, 20-a, Molodezhny sq. E-mail: iuriigutko@yandex.ru

Foundry sand cores based on organic binders have required tensile, compressive, and bending breaking points, as well as have an excellent knocking-out ability. However, increased requirements for the environmental friendliness of the foundry have led to a renewed interest in foundry sand cores based on inorganic binders including the sand-liquid-glass core-making technology. Foundry sand-liquid-glass cores are significantly inferior to foundry sand cores based on organic binders in terms of a knocking-out ability due to using a sufficiently large mass fraction of sodium silicate solute to achieve required breaking points of foundry sand-liquid-glass cores under tension, compression, and bending, which is accompanied by a deterioration in a knocking-out ability. Experimental studies aimed at selecting a composition of a sand-liquid-glass core mixture, which provides a required compressive breaking point of a foundry sand-liquid-glass core in combination with an improved knocking-out ability, are carried out. Experimental results for destruction of foundry sand-liquid-glass cores under compression, which are showing a possibility of achieving a combination of a required compressive breaking point and a good knocking-out ability, are presented. Ways to increase a strength of a foundry sand-liquid-glass core in places of contact with core locks, strengthen the most stress-prone areas of a foundry core, and decrease its compressive breaking point by reducing a mass fraction of sodium silicate solute, thereby improving a knocking-out ability, are considered. Structural robustness test results for foundry sand-liquid-glass cores of

the investigated composition under compression, as well as an effect of adding a circulating core mixture to the composition on a compressive breaking point are discussed. An effect for inhomogeneities of a foundry sand-liquid-glass core on its compressive breaking point is presented. Mathematical expressions for calculating a destruction probability of a foundry core containing an inhomogeneity are obtained.

Keywords. Foundry sand-liquid-glass core, core mixture, structural robustness test, compressive breaking point, knocking-out ability.

For citation. Gutko Yu. I., Voytenko V. V. Destruction investigation of foundry sand-liquid-glass cores under compression. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 3, pp. 41–48. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-41-48>.

Введение

Литейное производство цветных металлов и их сплавов имеет значительные резервы для дальнейшего развития [1–4]. Стержневым технологиям в литейном производстве отводится важное значение. Широкое распространение получили следующие стержневые процессы: Cold-Box-Amin-процесс, Эпокси-SO₂-процесс, Резол-CO₂-процесс и процесс на неорганическом связующем веществе CORDIS [5–10]. Повышение требований к экологичности литейного производства способствует усовершенствованию стержневых процессов на неорганических связующих веществах [11–13]. В последние годы возобновился повышенный интерес к песчано-жидкостекольной стержневой технологии – одной из наиболее экологических стержневых технологий [14–16]. Так, в настоящее время налажен выпуск связующих веществ на основе натриевого жидкого стекла, отверждаемых углекислым газом и эфирами: CARSIL, SOLOSIL, VELOSET, неорганического силикатного связующего вещества CORDIS и фосфатных связующих веществ. Одним из существенных недостатков песчано-жидкостекольных литейных стержней является их неудовлетворительная выбиваемость из отливок при повышенном содержании в стержневой смеси натриевого жидкого стекла, обеспечивающего необходимые манипуляторную и максимальную прочности. Использование песчано-жидкостекольных стержневых смесей с натриевым жидким стеклом с силикатным модулем 2,6–3,0 и плотностью $\geq 1,50$ г/см³ в количестве менее 4–6 мас. % не всегда обеспечивает набор литейными стержнями требуемых пределов прочности. Существуют перспективные способы отверждения натриевого жидкого стекла, в том числе с использованием микроволнового излучения, позволяющего существенно повысить производительность песчано-жидкостекольной стержневой технологии и прочность песчано-жидкостекольных литейных стержней [17–20]. Выбиваемость таких литейных стержней улучшается при уменьшении массовой доли натриевого жидкого стекла в стержневой смеси, однако из-за этого может увеличиться процент производственного брака при извлечении литейных стержней из стержневых ящиков, особенно для литейных стержней высокой и средней сложности, относящихся ко II и III классам сложности. Прочностные свойства песчано-жидкостекольных литейных стержней во многом зависят от рецептуры стержневой смеси. Продолжаются исследования песчано-жидкостекольных стержневых смесей с жидкими отвердителями, а также различными добавками, улучшающими эксплуатационные характеристики литейных стержней [21–24]. Поэтому поиск рецептуры песчано-жидкостекольной стержневой смеси, обеспечивающей оптимальное сочетание прочности и выбиваемости литейных стержней из отливок, является актуальной научно-технической задачей.

Цель работы – повышение предела прочности песчано-жидкостекольных литейных стержней в сочетании с хорошей выбиваемостью из отливок.

Методика проведения исследований

Для того чтобы обеспечить хорошую выбиваемость песчано-жидкостекольных литейных стержней из отливок, в экспериментах были использованы стержневые смеси с массовой долей натриевого жидкого стекла в диапазоне 12–17 мас. % с плотностью $1,46$ г/см³ следующего состава: натриево жидкое стекло – 56,25 мас. %; вода – 43,75 мас. %. Следует отметить, что в случае применения натриевого жидкого стекла другого состава и другой плотности его массовая доля в стержневой смеси может быть иной, например, при использовании натриевого жидкого стекла с силикатным модулем 2,2–2,5 и плотностью $1,50$ г/см³ его массовая доля в стержневой смеси может быть уменьшена до 3–6 мас. %¹. Стержневые ящики были изготовлены из полиэтилена, что обеспечивает хорошую извлекаемость литейных стержней из них. Использовали отверждение стержневой смеси углекислым газом в течение 30–90 мин при комнатной температуре и избыточном давлении газа в диапазоне 0,5–5,0 атм. Стержневые ящики находились

1 ГОСТ 13078-81. Стекло натриево жидкое. Технические условия.

в герметичной газовой камере. Углекислый газ подавали через газовый редуктор. Последующую сушку литейных стержней проводили на открытом воздухе при температуре 30–40 °С или в сушильном шкафу при температуре 120–160 °С. Использовали песчано-жидкостекольные стержневые смеси как на основе формовочного кварцевого песка марки 2К04А (ГОСТ 123891) с размером частиц 315–630 мкм, так и с добавлением отработанной стержневой смеси, которая была получена путем измельчения выбитых из отливок песчано-жидкостекольных литейных стержней.

Для того чтобы песчано-жидкостекольные литейные стержни обладали минимально необходимой манипуляторной прочностью, при которой они будут извлекаться из стержневых ящиков без дефектов, они должны быть изготовлены из стержневой смеси, состоящей из 15–17 мас.% натриевого жидкого стекла и 80 мас.% формовочного кварцевого песка марки 2К04А. Также они могут быть изготовлены с применением от 40 до 60 мас.% отработанной стержневой смеси и выдержаны в газовой камере в среде углекислого газа в течение 60–70 мин при избыточном давлении газа 2,0 атм до начала уменьшения его расхода, контролируемого газовым углекислотным манометром-расходомером. Была установлена близкая к линейной зависимость пределов прочности литейных стержней при растяжении, сжатии и изгибе (ГОСТ 23409.7-78) от времени выдержки в газовой камере в среде углекислого газа при избыточном давлении газа 2,0 атм в течение 30–90 мин. Так, при увеличении времени выдержки литейных стержней в среде углекислого газа от 30 до 60 мин наблюдалось повышение их манипуляторной прочности до 2 раз. Это означает, что можно увеличить пределы прочности литейного стержня при растяжении, сжатии и изгибе за счет увеличения времени выдержки в среде углекислого газа при избыточном давлении газа 2,0 атм в течение 30–90 мин, при этом не увеличивая массовую долю натриевого жидкого стекла в стержневой смеси. Установлено, что увеличение времени выдержки литейного стержня в среде углекислого газа после уменьшения расхода газа влияет на его прочность незначительно, поэтому в более длительной выдержке нет необходимости. В качестве примера на рис. 1 показана характерная форма сколов на экспериментальных образцах песчано-жидкостекольных литейных стержней цилиндрической формы после испытаний на предел прочности при сжатии. Конусная форма образцов литейных стержней со стороны приложения силы характеризует форму распределения внутренних напряжений перед их разрушением. Форму сколов образцов литейных стержней при их испытаниях на предел прочности при сжатии можно использовать в качестве дополнительного критерия оценки внутренней однородности литейного стержня.



Рис. 1. Форма сколов на образцах песчано-жидкостекольных литейных стержней цилиндрической формы после испытаний на предел прочности при сжатии

На рис. 2 показаны характерные диаграммы разрушения экспериментальных образцов песчано-жидкостекольных литейных стержней, содержащих 80 мас.% формовочного кварцевого песка марки 2К04А, 5 мас.% феррохромового шлака и 15 мас.% натриевого жидкого стекла при сжатии. Диаграммы разрушения образцов литейных стержней демонстрируют, насколько могут отличаться прочностные характеристики литейных стержней идентичного состава и одной партии. Для сравнения на рис. 3 показаны диаграммы разрушения образцов литейных стержней, в которых вместо кварцевого песка использовали отработанную стержневую смесь при сжатии. Линейное перемещение привода не соответствует реальному удлинению образца литейного стержня, так как опорные поверхности образца могут

в значительной степени хрупко разрушаться. Как видно из рис. 2, 3, предел прочности образцов литейных стержней, изготовленных из формовочного кварцевого песка, при сжатии составляет 0,15–0,25 МПа, а предел прочности образцов, изготовленных из отработанной стержневой смеси, – 0,30–0,35 МПа. Поэтому можно сделать вывод о том, что применение отработанной стержневой смеси при изготовлении песчано-жидкостекольных литейных стержней не снижает предела их прочности при сжатии.

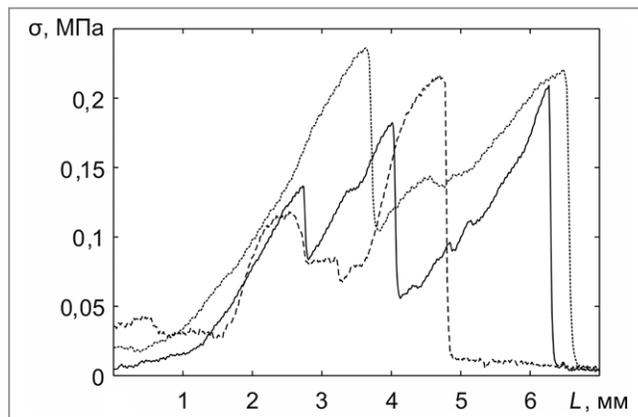


Рис. 2. Характерные диаграммы разрушения образцов литейных стержней, содержащих 80 мас. % формовочного кварцевого песка, 5 мас. % феррохромового шлака и 15 мас. % натриевого жидкого стекла, при сжатии: σ – механическое напряжение в образце литейного стержня при сжатии, МПа; L – линейное перемещение привода машины для испытаний материалов на прочность (не является фактическим удлинением образца литейного стержня), мм.

При испытаниях экспериментальных образцов песчано-жидкостекольных литейных стержней на прочность при растяжении в обоих случаях не достигается достаточная величина их манипуляторной прочности – 0,04–0,06 МПа. Повышение массовой доли натриевого жидкого стекла в стержневой смеси увеличивает манипуляторную прочность литейных стержней, но ухудшает их выбиваемость из отливок. Увеличение массовой доли феррохромового шлака в стержневой смеси до 50 мас. % увеличивает предел прочности литейных стержней при сжатии, а при большем содержании феррохромового шлака предел прочности литейных стержней при сжатии уменьшается.

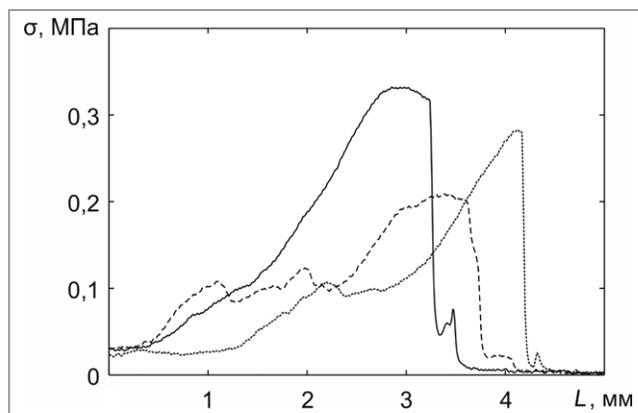


Рис. 3. Характерные диаграммы разрушения образцов литейных стержней, в которых вместо кварцевого песка использовали отработанную стержневую смесь, при сжатии. Обозначения те же, что на рис. 2

Таким образом, если массовая доля натриевого жидкого стекла в песчано-жидкостекольной стержневой смеси составляет 12–17 мас. %, то при массовой доле феррохромового шлака в диапазоне 6–8 мас. % достигается наилучшее сочетание предела прочности литейного стержня при сжатии и его выбиваемости из отливок. Если полностью исключить феррохромовый шлак из вышеописанной стержневой смеси, то предел прочности литейного стержня при растяжении будет снижен до 0,030–0,032 МПа. Исследование влияния соединений магния в феррохромовом шлаке на предел прочности литейного стержня при сжатии показало, что увеличение массовой доли соединений магния в стержневой смеси приводит к заметному уменьшению предела прочности литейного стержня при сжатии, а увеличение времени выдержки литейного стержня в среде углекислого газа на предел его прочности при сжатии не влияет. Также установлено, что в половине случаев при испытаниях экспериментальных образцов литейных

стержней на прочность при сжатии они разрушаются постепенно, растрескиваясь, с откалыванием небольших фрагментов поверхности, до достижения предела прочности, при котором образец разрушается мгновенно, поэтому диаграммы разрушения носят волнообразный характер с различным периодом колебаний механического напряжения, сопровождающего растрескивание и уплотнение поверхности литейного стержня, как показано на рис. 4.

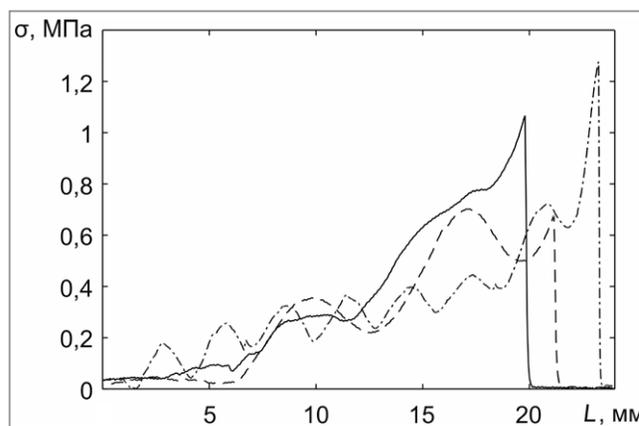


Рис. 4. Характерные диаграммы разрушения образцов литейных стержней при сжатии в случаях, когда наблюдается постепенное разрушение перед достижением предела прочности

Чтобы повысить предел прочности песчано-жидкостекольных литейных стержней, изготовленных по вышерассмотренным рецептурам, при сжатии и при этом не ухудшить их выбиваемость из отливок, авторами были внесены изменения в песчано-жидкостекольную стержневую технологию. После сушки и извлечения из полиэтиленового стержневого ящика литейные стержни снаружи покрывали слоем нагретого жидкого стекла плотностью $1,46 \text{ г/см}^3$ следующего состава: натриевое жидкое стекло – 56,25 мас.%; вода – 43,75 мас.%. Затем их дополнительно сушили в сушильном шкафу при температуре $120\text{--}160 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 40–60 мин. Как показали испытания таких литейных стержней, они имели значительно большую манипуляторную прочность, достаточную для бездефектного извлечения из стержневых ящиков; при этом их выбиваемость из отливок заметно не ухудшилась. В литейных стержнях реже образовывались сколы (см. рис. 1). Литейные стержни постепенно разрушались, выдерживая более длительные нагрузки, близкие к пределу прочности при сжатии.

Предел прочности песчано-жидкостекольного литейного стержня при сжатии определяется величиной критических напряжений и пределом прочности, при достижении которых он разрушается. Разрушение литейного стержня происходит при разрыве связей между его частицами. Преобладает хрупкое разрушение (раскрашивание), так как песчано-жидкостекольный литейный стержень содержит большое количество неоднородностей, являющихся потенциальными источниками разрушения при нагружении.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты исследований разрушения большого количества объемных экспериментальных образцов песчано-жидкостекольных литейных стержней при сжатии показали, что существуют большие разбросы по пределу прочности при сжатии и форме диаграмм разрушения, что объясняется наличием в образцах одной либо нескольких критических неоднородностей. На границе такой неоднородности возникает концентрация механических напряжений, превышающих среднее механическое напряжение в объемном образце литейного стержня:

$$\sigma_n = n \sigma_a,$$

где σ_n – локальное механическое напряжение на границах неоднородности, Па; n – коэффициент критичности неоднородности для разрушения объемного образца литейного стержня; a – коэффициент формы неоднородности; $a = l_{\max} / l_{\min}$, где l_{\max} и l_{\min} – соответственно максимальный и минимальный линейные размеры неоднородности.

Зависимость коэффициента критичности неоднородности для разрушения объемного экспериментального образца песчано-жидкостекольного литейного стержня от формы и пространственной ориентации неоднородности по отношению к вектору приложенного усилия сжатия аппроксимирована следующим выражением:

$$n(\theta, a) = \begin{cases} (n_m - 1) \cdot \sin(2\theta) + 1, & a > 1, \\ 1, & a = 1, \end{cases}$$

где $\theta = \angle(\bar{p}, \bar{l})$ рад; \bar{p} – вектор приложенного усилия сжатия; \bar{l} – вектор, направленный вдоль максимального линейного размера неоднородности при $a > 1$, причем направление \bar{l} выбирается из условия $\angle(\bar{p}, \bar{l}) < \pi/2$; при $\theta = \pi/4$ и $a > 1$ максимальное значение коэффициента критичности неоднородности для разрушения объемного образца литейного стержня $n_m = n(\theta, a)$.

Работа разрушения по внешней границе неоднородности образца литейного стержня, Дж:

$$A_r = k_1 n \rho W S,$$

где k_1 – коэффициент хрупкого разрушения образца литейного стержня; ρ – поверхностная плотность связей на границе неоднородности, м^{-2} ; W – энергия связи на границе неоднородности, Дж; S – площадь поверхности неоднородности, м^2 .

Работа сил упругости при нагружении неоднородности образца литейного стержня, Дж:

$$A_u = k \sigma_n^2 u^{-1} a l_{max}^2,$$

где k – коэффициент пропорциональности, м; u – модуль сдвига, Па, который определяется экспериментально по величине среднего угла γ образующихся сколов на образце литейного стержня: $u = \sigma_i / \gamma$.

Коэффициент формы неоднородности a также определяется экспериментально по средней величине сколов на образце литейного стержня при испытаниях на предел прочности при сжатии либо задается в эксперименте созданием искусственной неоднородности путем введения в образец инородного тела при его изготовлении.

Рассматривая предельный случай, перед началом разрушения образца литейного стержня, когда $A_r = A_u$, получаем предельное локальное механическое напряжение на границах неоднородности, начиная с которого существует высокая вероятность разрушения образца, содержащего такую неоднородность:

$$\sigma_n = \frac{1}{l_{max}} \left[\frac{k_1 n \rho W S u}{k a} \right]^{1/2}.$$

Вероятность разрушения при $\sigma > \sigma_n$ для песчано-жидкостекольного литейного стержня с объемом, превышающим объем экспериментального образца, может быть оценена по следующей формуле:

$$P(\sigma) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_n} \right)^m, \sigma \leq \sigma_n,$$

где $m = V_c / V_0$; V_c – объем литейного стержня, м^3 ; V_0 – объем экспериментального образца литейного стержня, м^3 .

Выводы

Показана возможность улучшения выбиваемости песчано-жидкостекольного литейного стержня из отливки при сохранении необходимого предела прочности при сжатии путем подбора рецептуры стержневой смеси. Установлено, что дополнительное покрытие песчано-жидкостекольных литейных стержней натриевым жидким стеклом (состав: натриевое жидкое стекло – 56,25 мас.%; вода – 43,75 мас.%) плотностью 1,46 г/см³ в значительной мере улучшает их эксплуатационные свойства. Также установлено, что аналогичным способом может быть увеличен предел прочности литейных стержней при сжатии, изготовленных по альтернативным стержневым технологиям, с применением органических и неорганических связующих веществ, что позволяет улучшить выбиваемость таких литейных стержней из отливок, сэкономить связующее вещество и повысить экологичность литейного производства при некотором снижении производительности стержневого процесса. Результаты испытаний экспериментальных образцов песчано-жидкостекольных литейных стержней на прочность при сжатии показали влияние неоднородностей на вероятность разрушения и величину предела прочности при сжатии. Полученные математические выражения позволяют оценить вероятность разрушения песчано-жидкостекольного литейного стержня, имеющего в своем объеме неоднородность. Установлено, что форму сколов образцов литейных стержней при испытаниях на прочность при сжатии можно использовать в качестве дополнительного критерия оценки внутренней однородности литейного стержня, по которому можно судить о качестве исходных компонентов и качестве приготовления стержневой смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zolotarevskiy V.S., Belov N.A., Glazoff M.V.** Casting Aluminum Alloys. Amsterdam: Elsevier, 2007. 544 p.
2. **Курдюмов, А.В.** Производство отливок из сплавов цветных металлов: учеб. / А.В. Курдюмов, В.Д. Белов, М.В. Пикунов, В.М. Чурсин, С.П. Герасимов, В.С. Моисеев. М.: МИСиС, 2011. 615 с.
3. **Brown J.R.** Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook. 11th Ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 1994. 309 p.
4. **Gupta A.R., Aloni S.N., Kumar R., Binzade H.** A Review on Issues Related to Manual Core-Making Process in Foundry Industry // International Journal for Scientific Research & Development. Ahmedabad, India: IJSRD. 2016. Vol. 3. No. 11. P. 355–357.
5. **Псиминос А.Х., Милеева Т.С., Сипос М.М., Эдер Г., Мельников А.П.** Актуальные разработки связующих систем PUR-Cold-Box для изготовления стержней фирмы «Furtenbach GmbH», Австрия. 26 с.
6. **Саначева Г.С., Дубова И.В., Вострикова Н.М., Леонтьев Е.Г., Гильманшина Т.Р.** «Холодные» стержни – перспектива повышения качества литейной продукции ремонтно-механической базы Ачинского филиала РИК // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2014. № 4. С. 456–461.
7. **Псиминос А.Х., Эдер Г., Сипос М.М.** Смолы холодного отверждения с незначительным выделением вредных веществ и запаха (Cold-Box), абсолютно не имеющие ароматических растворителей // Литье и металлургия. 2011. № 2 (60). С. 23–31.
8. **Щетинин А.А., Аммер В.А., Турищев Ю.Ю.** Преимущества и перспективы применения холоднотвердеющих смесей при изготовлении ответственных и высоконагруженных отливок для авиационной промышленности // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. 2011. № 11 (2). С. 68–70.
9. **Дорошенко С.П., Авдокушин В.П., Русин К., Мацашек И.** Формовочные материалы и смеси. Киев: Высш. шк., 1990. 415 с.
10. **Болдин А.Н., Давыдов Н.И., Жуковский С.С.** Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия: справ. М.: Машиностроение, 2006. 507 с.
11. **Лехте К., Боэм Р.** CORDIS – связующее на неорганической основе. Свойства и опыт использования. 6 с.
12. **Bieda S.** CORDIS Inorganic Binder System. Properties and Experience. Technical'2006. Nowa Sól, Poland. 2006. P. 63–71.
13. **Holtzer M., Grabowska B.** Modern Sand Moulds with Inorganic Binder. Technical'2008. Nowa Sól, Poland. 2008. P. 93–98.
14. **Давиденко А.К., Иванов Б.К., Охрименко Г.П., Пономаренко О.И.** Самоотвердеющие жидкостекольные формовочно-стержневые смеси для изготовления отливок энергетического оборудования // Металл и литье. 2018. № 3–4 (298–299). С. 34–39.
15. **Илларионов И.Е., Петрова Н.В.** Жидкостекольные смеси, отверждаемые продувкой углекислым газом // Тр. Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород: НГТУ, 2011. № 2 (87). С. 208–213.
16. **Каратеев, А.М.** Опыт и перспективы использования смесей на основе жидкого стекла с эфирными отвердителями / А.М. Каратеев, О.И. Пономаренко, Т.В. Берлизова, О.С. Калкманова, В.В. Юрченко // Металл и литье. 2018. № 3–4 (298–299). С. 40–46.
17. **Zan X.L., Fan Z.T., Wang J.N., Pan D.** Performances of Sodium Silicate Sand Hardened by Microwave Heating. Foundry. Shenyang: FICMES, 2008. No. 57 (4). P. 384–387.
18. **Тепляков С.Д., Сафронов В.А.** Жидкие отвердители бинарного состава для жидкостекольных ХТС // Литейное производство. 1989. № 4. С. 7–8.
19. **Жуковский С.С.** Методы регулирования остаточной прочности жидкостекольной ХТС с ацетатами этиленгликоля / С.С. Жуковский, В.А. Сафронов, С.Д. Тепляков, А.Е. Задов, Т.С. Муравьева // Литейное производство. 1990. № 4. С. 12–14.
20. **Пономаренко О.И., Евтушенко Н.С., Берлизова Т.В.** Влияние жидких отвердителей с разными добавками на свойства жидкостекольных смесей // Литейное производство. 2011. № 4. С. 21–24.
21. **Борсук П.А., Игнатъев В.Н.** Жидкостекольные смеси с жидкими отвердителями // Литейное производство. 1982. № 8. С. 18–20.
22. **Никифоров А.П.** Жидкий отвердитель для самоотвердеющих жидкостекольных смесей // Литейное производство. 1988. № 8. С. 26–27.
23. **Берлизова Т.В., Пономаренко О.И.** Исследование влияния комплексной разупрочняющей добавки на свойства холоднотвердеющих смесей на жидком стекле // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2014. № 4. С. 27–30.
24. **Берлизова Т.В.** Использование холоднотвердеющих смесей на жидком стекле с применением циклокарбонатов // Вестн. НТУ «ХПИ». 2013. № 42 (1015). С. 21–26.

REFERENCES

1. **Zolotarevskiy V.S., Belov N.A., Glazoff M.V.** Casting Aluminum Alloys. Amsterdam: Elsevier, 2007. 544 p.
2. **Kurdyumov A.V., Belov V.D., Pikunov M.V., Chursin V.M., Gerasimov S.P., Moiseev V.S.** Proizvodstvo otlivok iz splavov tsvetnykh metallov: Uchebnik [Casting Production of Non-Ferrous Alloys: Textbook]. Moscow, MISiS Publ., 2011, 615 p.
3. **Brown J.R.** Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook. 11th Ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 1994. 309 p.
4. **Gupta A.R., Aloni S.N., Kumar R., Binzade H.** A Review on Issues Related to Manual Core-Making Process in Foundry Industry. International Journal for Scientific Research & Development. Ahmedabad, India: IJSRD, 2016. Vol. 3. No. 11. P. 355–357.
5. **Psimenos A. Kh., Mileeva T.S., Sipos M.M., Eder G., Melnikov A.P.** Aktual'nyye razrabotki svyazuyushchikh sistem PUR-Cold-Box dlya izgotovleniya stержней firmy "Furtenbach GmbH", Avstriya [Current Developments of PUR-Cold-Box Binding Systems for Core-Making by Furtenbach GmbH, Austria]. 26 p.
6. **Sanacheva G.S., Dubova I.V., Vostrikova N.M., Leontiev E.G., Gilmanshina T.R.** "Kholodnyye" sterzhni – perspektiva povysheniya kachestva liteynoy produktsii remontno-mekhanicheskoy bazy Achinskogo filiala RIK ["Cold" Cores are Prospect for Quality Improvement of Foundry Products for Repair and Mechanical Base in Achinsk Branch of Russian Engineering Company]. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. Krasnoyarsk: SibFU, 2014, no. 4, pp. 456–461.
7. **Psimenos A. Kh., Eder G., Sipos M.M.** Smoly kholodnogo otverzhdeniya s neznachitel'nym vydeleniyem vrednykh veshchestv i zapakha (Cold-Box), absolyutno ne imeyushchiye aromatische kikh rastvoriteley [Cold-Curing Resins with Low Emission of Harmful Substances and Smell (Cold-Box), which are Absolutely Free of Aromatic Solvents]. Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy, 2011, no. 2 (60), pp. 23–31.

8. **Shchetinin A.A., Ammer V.A., Turishchev Yu. Yu.** Preimushchestva i perspektivy primeneniya kholodnotverdeyushchikh smesey pri izgotovlenii otvetstvennykh i vysokonagruzhenykh otlivok dlya aviatsionnoy promyshlennosti [Advantages and Prospects for Use of Cold-Hardening Mixtures in Production of Critical and High-Load Castings for Aviation Industry]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2011, no. 11 (2), pp. 68–70.
9. **Doroshenko S.P., Avdokushin V.P., Rusin K., Matsashek I.** *Formovochnyye materialy i smesi* [Molding Materials and Mixtures]. Kiev, High School Publ., 1990, 415 p.
10. **Boldin A.N., Davydov N.I., Zhukovsky S.S.** *Liteynyye formovochnyye materialy. Formovochnyye, sterzhnevyye smesi i pokrytiya* [Foundry Molding Materials. Molding Mixtures, Core Mixtures, and Coatings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006, 507 p.
11. **Lehte K., Boehm R.** *CORDIS – svyazuyushcheye na neorganicheskoy osnove. Svoystva i opyt ispol'zovaniya* [CORDIS is Inorganic-Based Binder. Properties and Experience of Use]. 6 p.
12. **Bieda S.** CORDIS Inorganic Binder System. Properties and Experience. Technical'2006. Nowa Sól, Poland, 2006, pp. 63–71.
13. **Holtzer M., Grabowska B.** Modern Sand Moulds with Inorganic Binder. Technical'2008. Nowa Sól, Poland, 2008, pp. 93–98.
14. **Davidenko A.K., Ivanov B.K., Okhrimenko G.P., Ponomarenko O.I.** Samotverdeyushchiye zhidkostekol'nyye formovochno-sterzhnevyye smesi dlya izgotovleniya otlivok energeticheskogo oborudovaniya [Self-Hardening Liquid-Glass Molding and Core Mixtures for Casting Production of Power Equipment]. *Metall i lit'e = Metal and Foundry*, 2018, no. 3–4 (298–299), pp. 34–39.
15. **Illarionov I.E., Petrova N.V.** Zhidkostekol'nyye smesi, otverzhdayemye produvkoy uglekislym gazom [Liquid-Glass Mixtures Cured by Blowing with Carbon Dioxide]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R. E. Alekseeva = Works of Nizhny Novgorod State Technical University*. Nizhny Novgorod, NNSTU Publ., 2011, no. 2 (87), pp. 208–213.
16. **Karateev A.M., Ponomarenko O.I., Berlizeva T.V., Kalkamanova O.S., Yurchenko V.V.** Opyt i perspektivy ispol'zovaniya smesey na osnove zhidkogo stekla s efinymi otverditelyami [Experience and Prospects for Use of Mixtures Based on Liquid Glass with Ether Hardeners]. *Metall i lit'e = Metal and Foundry*, 2018, no. 3–4 (298–299), pp. 40–46.
17. **Zan X.L., Fan Z.T., Wang J.N., Pan D.** Performances of Sodium Silicate Sand Hardened by Microwave Heating. Foundry. Shenyang: FICMES, 2008, no. 57 (4), pp. 384–387.
18. **Teplyakov S.D., Safronov V.A.** Zhidkiye otverditeli binarnogo sostava dlya zhidkostekol'nykh KhTS [Liquid Hardeners of Binary Composition for Liquid-Glass Cold-Hardening Mixtures]. *Liteinoye proizvodstvo = Foundry production*, 1989, no. 4, pp. 7–8.
19. **Zhukovsky S.S., Safronov V.A., Teplyakov S.D., Zadov A.E., Muravyova T.S.** Metody regulirovaniya ostatochnoy prochnosti zhidkostekol'noy KhTS s atsetatami etilenglikolya [Regulation Methods for Residual Strength of Liquid-Glass Cold-Hardening Mixtures with Ethylene Glycol Acetates]. *Liteinoye proizvodstvo = Foundry production*, 1990, no. 4, pp. 12–14.
20. **Ponomarenko O.I., Evtushenko N.S., Berlizeva T.V.** Vliyaniye zhidkikh otverditeley s raznymi dobavkami na svoystva zhidkostekol'nykh smesey [Influence of Liquid Hardeners with Different Additives on Properties of Liquid-Glass Mixtures]. *Liteinoye proizvodstvo = Foundry production*, 2011, no. 4, pp. 21–24.
21. **Borsuk P.A., Ignatiev V.N.** Zhidkostekol'nyye smesi s zhidkimi otverditelyami [Liquid-Glass Mixtures with Liquid Hardeners]. *Liteinoye proizvodstvo = Foundry production*, 1982, no. 8, pp. 18–20.
22. **Nikiforov A.P.** Zhidkiy otverditel' dlya samotverdeyushchikh zhidkostekol'nykh smesey [Liquid Hardener for Self-Hardening Liquid-Glass Mixtures]. *Liteinoye proizvodstvo = Foundry production*, 1988, no. 8, pp. 26–27.
23. **Berlizeva T.V., Ponomarenko O.I.** Issledovaniye vliyaniya kompleksnoy razuprochnyayushchey dobavki na svoystva kholodnotverdeyushchikh smesey na zhidkom stekle [Influence Research of Complex Softening Additive on Properties of Cold-Hardening Liquid-Glass Mixtures]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' = Metallurgical and Mining Industry*. 2014, no. 4, pp. 27–30.
24. **Berlizeva T.V.** Ispol'zovaniye kholodnotverdeyushchikh smesey na zhidkom stekle s primeneniyyem tsiklokarbonatov [Use of Cold-Hardening Liquid-Glass Mixtures with Cyclic Carbonates]. *Vestnik NTU "KhPI" = Bulletin of NTU "KhPI"*, 2013, no. 42 (1015), pp. 21–26.