

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.743.42

Гутько Ю.И., Войтенко В.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И ВЫБИВАЕМОСТИ ПЕСЧАНО-ЖИДКОСТЕКОВЫХ ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ СТАЛЬНОЙ ПОРОШОК

Аннотация. В литейном производстве часто применяются песчаные литейные стержни, которые могут быть изготовлены по различным стержневым технологиям. Повышение требований к экологичности литейного производства приводит к возобновлению интереса к песчано-жидкостеклянной стержневой технологии, которая использует экологичные химические соединения в качестве компонентов стержневой смеси, связующего комплекса и катализатора отвердителя. Кроме того, песчано-жидкостеклянная стержневая технология позволяет использовать оборотную стержневую смесь и отходы металлургического, машиностроительного, горнодобывающего и деревообрабатывающего производства. Авторами статьи исследована возможность применения мелкодисперсного стального порошка, являющегося отходами машиностроительного производства, в песчано-жидкостеклянной стержневой технологии. Приведены результаты сравнительных экспериментальных исследований манипуляторной и максимальной прочностей образцов песчано-жидкостеклянных литейных стержней, изготовленных из стержневой смеси контрольного состава и стержневой смеси, содержащей от 1 до 10 % мелкодисперсного стального порошка, при растяжении, сжатии и изгибе, а также результаты сравнительных испытаний таких литейных стержней на выбиваемость из отливок. Описаны рецептуры исследованных стержневых смесей и технология изготовления образцов песчано-жидкостеклянных литейных стержней с содержанием стального порошка. Обсуждаются результаты исследований и область применения песчано-жидкостеклянных литейных стержней с содержанием мелкодисперсного стального порошка.

Ключевые слова: литейное производство, литейный стержень, стержневая технология, стержневой ящик, стержневая смесь, рецептура, связующее вещество, стальной порошок, углекислый газ, отходы шлифовального производства, выбиваемость, испытание на прочность.

Введение

В литейном производстве широкое распространение получили песчаные литейные стержни, которые обычно изготавливаются непосредственно на стержневом участке литейного цеха [1]. Существуют следующие наиболее распространенные стержневые процессы для изготовления песчаных литейных стержней: Cordis-процесс, CO₂-процесс на жидком стекле, Эпокси-SO₂-процесс, Резол-CO₂-процесс и Cold-Box-Amin-процесс [2, 3]. Среди указанных стержневых процессов в настоящее время по распространенности в мире лидирует Cold-Box-Amin-процесс, доля которого составляет около 80 % [4]. В качестве связующего вещества используются фенолорезольные смолы при их процентном содержании в стержневой смеси в количестве нескольких процентов, обеспечивающие высокую скорость набора манипуляторной и максимальной прочностей [5]. Несмотря на неоспоримые достоинства Cold-Box-Amin-процесса по сравнению с другими стержневыми процессами, получившими достаточно широкое распространение, этот процесс не является самым экологичным среди стержневых процессов. Существующая в мире тенденция к повышению экологичности литейного производства способствует росту интереса к альтернативным стержневым процессам, имеющим более высокую экологичность. Например, возрастает интерес к использованию оборотной стержневой смеси и других отходов производства в стержне-

вой технологии. Поэтому возобновляется интерес к песчано-жидкостеклянной стержневой технологии, которая использует экологичные и химически безвредные компоненты стержневой смеси, связующее вещество и газообразный отвердитель [6]. Песчано-жидкостеклянная стержневая технология позволяет использовать оборотную стержневую смесь, а также всевозможные компоненты стержневой смеси, являющиеся отходами производства, такие как древесные опилки, угольная пыль, феррохромовый шлак, графит и др. [7]. Песчано-жидкостеклянная стержневая технология уступила свое место другим стержневым технологиям в основном из-за сравнительно низкой производительности и недостаточно хорошей выбиваемости песчано-жидкостеклянных литейных стержней из отливок. Таким образом, повышение производительности песчано-жидкостеклянного стержневого процесса и улучшение выбиваемости песчано-жидкостеклянных литейных стержней из отливок в настоящее время являются актуальными научно-техническими задачами, которые могут быть решены путем обоснованного подбора рецептуры стержневой смеси в соответствии с параметрами и назначением песчано-жидкостеклянного литейного стержня. Так, изменение процентного содержания жидкого стекла в стержневой смеси в сочетании с изменением временем выдержки песчано-жидкостеклянного литейного стержня в среде углекислого газа, температурой литейного стержня и углекислого газа, а также временем и температурным режимом последующей сушки литейного стержня оказывает влияние на скорость набора

прочности литейным стержнем, а также на величины его манипуляторной и максимальной прочностей. Добавление в рецептуру стержневой смеси всевозможных добавок позволяет улучшить выбиваемость песчано-жидкостекольных литейных стержней из отливок. В качестве таких добавок могут выступать отходы металлургического, машиностроительного, горнодобывающего и деревообрабатывающего производства.

В машиностроении широко применяется шлифование и другая обработка стальных изделий связанным или свободным абразивом [8]. Образующийся в результате такой обработки мелкодисперсный стальной порошок не подлежит повторной металлургической переработке, т.к. будет в основном выгорать в процессе плавки. Кроме того, запасы таких отходов недостаточны для того, чтобы их металлургическая переработка была экономически оправданной [9]. Можно использовать стальной порошок в качестве добавки при изготовлении песчано-жидкостекольных литейных стержней. Отходы шлифовального производства могут быть легко разделены на стальной порошок и фрагменты абразива в магнитном поле. Достаточно часто при шлифовании связанным абразивом в отходах шлифовального производства соотношение стального порошка к фрагментам и зернам абразива более чем 1000:1, поэтому отделение абразива от стального порошка не требуется [10].

Использование стального порошка в качестве добавки к песчано-жидкостекольной стержневой смеси и его влияние на прочность литейных стержней при растяжении, сжатии и изгибе на скорость набора ими манипуляторной и максимальной прочностей, а также на выбиваемость таких литейных стержней из отливок недостаточно исследовано, поэтому проведение исследований в этом направлении является актуальным.

Материалы и методы исследований

Экспериментальные исследования проводились согласно следующей методике. Приготавливались рецептуры стержневой смеси, содержащие 20,0 мас.% жидкого натриевого стекла с плотностью 1,44 кг/л, 10,0 мас.% портландцемента марки М-400, 60,0–69,5 мас.% кварцевого песка и 0,5–10,0 мас.% стального порошка с размером частиц от 50 до 450 мкм с преобладанием фракции 85–255 мкм, полученного из шлифовального шлама стали марки 40Х. Химический состав стального порошка: железо – ~97 мас. %; углерод – 0,36–0,44 мас. %; кремний – 0,17–0,37 мас. %; марганец – 0,5–0,8 мас. %; никель – до 0,3 мас. %; сера – до 0,035 мас. %; фосфор – до 0,035 мас. %; хром – 0,8–1,1 мас. %; медь – до 0,3 мас. %.

Предварительные эксперименты показали, что массовая доля стального порошка более 10 % приводит к заметному снижению податливости песчано-жидкостекольных литейных стержней, поэтому такие литейные стержни дают значительную усадку в стержневом ящике, что может привести к образова-

нию усадочных трещин, а также из-за недостаточной податливости могут образовываться горячие трещины при заполнении литейной системы расплавом. Также было установлено, что массовая доля стального порошка более 10 % приводит к заметному снижению газопроницаемости песчано-жидкостекольного литейного стержня, однако при этом уменьшается газо-выделение в его объеме.

Во всех случаях изготавливались две стержневые смеси: одна – контрольная, без добавления стального порошка, а другая – с добавлением стального порошка. Полиэтиленовый стержневой ящик заполнялся обеими стержневыми смесями таким образом, что девять образцов литейных стержней были изготовлены из контрольной смеси, а еще девять – из стержневой смеси, содержащей стальной порошок.

Таким образом были приготовлены стержневые смеси со следующими массовыми долями стального порошка в стержневой смеси, %: 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 6,0; 8,0; 10,0. При этом массовая доля кварцевого песка составляла, %: 69,5; 69,0; 68,0; 66,0; 64,0; 62,0; 60,0. Массовые доли других компонентов стержневой смеси оставались неизменными.

Затем стержневой ящик помещался в вакуумную камеру, из которой в течение 1 мин откачивался воздух. Затем вакуумная камера наполнялась углекислым газом под избыточным давлением 2 атм при расходе углекислого газа около 5 л/мин. В этих условиях стержневой ящик выдерживался 30, 40 или 60 мин в зависимости от номера эксперимента. По истечении указанного времени выдержки стержневой ящик извлекался из вакуумной камеры непосредственно после прекращения подачи углекислого газа и сушился одним из следующих способов: на открытом воздухе при комнатной температуре в течение 6 ч или в течение 1 ч при температуре 140–160°C.

После остывания до комнатной температуры образцы литейных стержней специальной формы подвергались испытаниям на прочность при растяжении, сжатии и изгибе. Результаты испытаний литейных стержней контрольного и исследуемого составов на прочность статистически обрабатывались, а также рассчитывались математические ожидания и дисперсии прочности образцов литейных стержней при растяжении или сжатии.

На следующем этапе исследовалась скорость набора литейным стержнем манипуляторной и максимальной прочностей, для чего использовались полиэтиленовые стержневые ящики, рассчитанные на один литейный стержень. Испытания литейных стержней на прочность проводились путем последовательного испытания литейных стержней с различным временем выдержки в среде углекислого газа и с различным временем последующей сушки до момента их извлечения из стержневых ящиков.

Испытания литейных стержней на выбиваемость из отливок проводились с использованием введенной десятибалльной шкалы выбиваемости, в которой один

балл соответствует отличной выбиваемости, а десять баллов – затруднительной выбиваемости. Перед испытаниями на выбиваемость литейный стержень подвергался тепловому воздействию не менее 30 мин при температуре не ниже 500°C.

Результаты исследований и их обсуждение

В ходе экспериментальных исследований авторами было установлено следующее. Стальные порошки, являющиеся отходами шлифовального производства, могут быть повторно использованы при приготовлении стержневых смесей с использованием натриевого жидкого стекла в качестве связующего вещества. При этом не только заметно повышаются манипуляторная и максимальная прочности песчано-жидкостекольных литейных стержней, но также заметно улучшается их выбиваемость из отливок.

Увеличение манипуляторной и максимальной прочностей песчано-жидкостекольных литейных стержней, содержащих стальные порошки, объясняется более высокой адгезией (адгезионными связями) со стороны натриевого жидкого стекла к стали (55 кПа) по сравнению с адгезией к кварцевому песку (35 кПа), что подтверждено экспериментально.

Улучшение выбиваемости из отливок песчано-жидкостекольных литейных стержней, содержащих стальные порошки, объясняется более высоким коэффициентом теплопроводности стали (8–60 Вт/(м·К)) по сравнению с коэффициентом теплопроводности других распространенных компонентов песчано-жидкостекольной стержневой смеси (табл. 1), что способствует более быстрому прогреву объема литейного стержня и, следовательно, более длительному тепловому воздействию на его объем при заполнении литейной системы расплавом.

Таблица 1

Параметры компонентов песчано-жидкостекольной стержневой смеси

Материал	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Кварцевый песок	2090	0,30
Сталь 40Х	466–664	42–48
Портландцемент	800	0,6–0,7
Феррохромовый шлак	934	1,45
Графит	712–1675	100,0–354,1

По результатам сравнительного анализа результатов экспериментов установлено, что скорость набора литейным стержнем манипуляторной и максимальной прочностей возрастает с увеличением доли стального порошка в стержневой смеси, однако при этом увеличивается усадка стержневой смеси, что может увеличить брак при производстве литейных стержней, связанный с образованием усадочных трещин.

При увеличении доли стального порошка в пес-

чано-жидкостекольной стержневой смеси до 5 % и более возможно уменьшение времени выдержки литейного стержня в среде углекислого газа до двух раз: от 60 до 30 мин. В этом случае при уменьшении времени выдержки литейных стержней в среде углекислого газа были получены значения манипуляторной и максимальной прочностей литейных стержней, близкие к значениям для литейных стержней контрольного состава. Литейные стержни с содержанием стального порошка до 10 % имеют отличную выбиваемость, соответствующую одному баллу по десятибалльной шкале выбиваемости, в то время как литейные стержни, изготовленные из контрольной стержневой смеси, имеют выбиваемость 3–4 балла.

Таким образом, использование в стержневой смеси от 5 до 10 % стального порошка позволяет одновременно улучшить следующие параметры песчано-жидкостекольных литейных стержней: уменьшить время набора манипуляторной и максимальной прочностей до двух раз, уменьшить время выдержки в среде углекислого газа до двух раз, получить экономию углекислого газа до двух раз, повысить манипуляторную и максимальную прочности при растяжении до пяти раз, при сжатии — до десяти раз, при изгибе — до пяти раз, улучшить выбиваемость литейных стержней из отливок до четырех раз.

В качестве примера на рис. 1–4 приведены результаты испытаний песчано-жидкостекольных литейных стержней контрольного состава и с добавлением 10 % стального порошка после выдержки в среде углекислого газа в течение 30 мин при давлении 2 атм и среднем расходе углекислого газа 5 л/мин с последующей сушкой на открытом воздухе при комнатной температуре в течение 6 ч на прочность при растяжении и сжатии.

На графиках (см. рис. 1–4) используются следующие обозначения: σ – прочность образца литейного стержня при растяжении или сжатии, МПа; L – удлинение образца литейного стержня при испытаниях на прочность, мм.

Закономерности влияния железного порошка, входящего в состав песчано-жидкостекольной стержневой смеси, на выбиваемость песчано-жидкостекольных стержней в аналитической форме могут быть представлены в следующем виде.

Выбиваемость

$$N = \frac{W_{\Sigma}}{W_0} = \frac{1}{W_0} \sum_{i=1}^2 N_i k_i \iiint_V v_i(x, y, z) dx dy dz,$$

где W_{Σ} – суммарная энергия связей в песчано-жидкостекольном литейном стержне объемом V , Дж; W_0 – энергия однократного удара установки для испытаний на выбиваемость, Дж;

N_1 – среднее количество связей, образованных одной частицей геля SiO_2 , полученного по реакции взаимодействия жидкого стекла с углекислым газом;

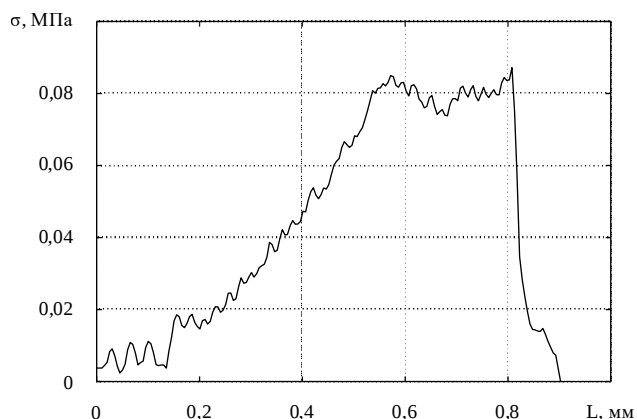


Рис. 1. Результаты испытаний образцов песчано-жидкостекольных литейных стержней, изготовленных из стержневой смеси контрольного состава, на прочность при растяжении

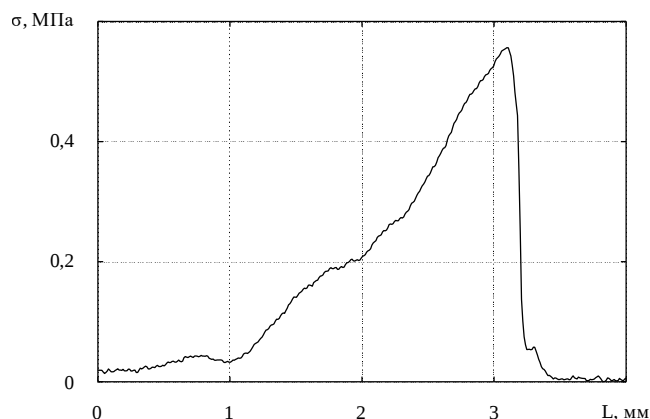


Рис. 2. Результаты испытаний образцов песчано-жидкостекольных литейных стержней, изготовленных из стержневой смеси контрольного состава, на прочность при сжатии

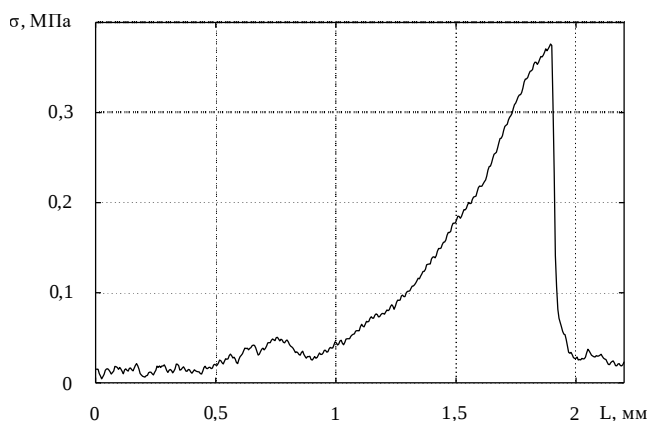


Рис. 3. Результаты испытаний образцов песчано-жидкостекольных литейных стержней, изготовленных из стержневой смеси с добавлением 10 % стального порошка, на прочность при растяжении

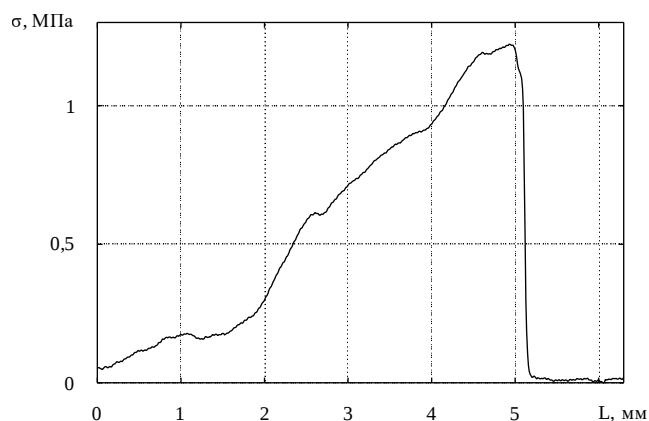


Рис. 4. Результаты испытаний образцов песчано-жидкостекольных литейных стержней, изготовленных из стержневой смеси с добавлением 10 % стального порошка, на прочность при сжатии

k_1 – удельная энергия связи частицы геля SiO_2 с окружающими частицами, являющаяся функцией силикатного модуля жидкого стекла, Дж/связь;

N_2 – среднее количество связей, образованных одной частицей Fe_2O_3 , находящейся на поверхности частиц стального порошка;

k_2 – удельная энергия связи частицы Fe_2O_3 с окружающими молекулами жидкого стекла, Дж/связь;

v_1 – функция распределения по объему литейного стержня для частиц геля SiO_2 , полученного по реакции взаимодействия жидкого стекла с углекислым газом, равная концентрации поглощенного песчано-жидкостекольным литейным стержнем углекислого газа, м^{-3} ;

v_2 – функция распределения по объему литейного стержня для частиц Fe_2O_3 , находящейся на поверхности частиц стального порошка, м^{-3} .

Количество частиц Fe_2O_3 , приходящихся на одну

частицу Fe,

$$N_0 = (d / d_0)^2,$$

где d – средний диаметр частицы железного порошка, м; d_0 – средний диаметр молекулы Fe_2O_3 , м.

Концентрация частиц Fe_2O_3 , м^{-3} ,

$$n_0 = \frac{\eta N_0}{V \cdot 100\%},$$

где η – процентное содержание железа в стержневой смеси, %.

Тогда условие нормировки для функции распределения $v_2(x, y, z)$ запишем в виде

$$\iiint_V v_2(x, y, z) dx dy dz = \frac{\eta N_0}{100\%}.$$

Применение предложенной математической мо-

дели позволит провести численные эксперименты, по результатам которых на производстве возможно вычислить по заданной выбиваемости предельное процентное содержание стального порошка в песчано-жидкостекольной стержневой смеси либо решить обратную задачу. Это позволит научно обоснованно и прогнозируемо вводить в состав песчано-жидкостекольной стержневой смеси отходы шлифовального производства в виде стальных частиц.

Заключение

Результаты экспериментальных исследований показали возможность эффективного использования отходов шлифовального производства в виде стального порошка с массовой долей до 10 % при приготовлении песчано-жидкостекольных стержневых смесей, что позволяет значительно улучшить эксплуатационные характеристики песчано-жидкостекольных литейных стержней в литейном производстве. Увеличение скорости набора и повышение манипуляторной и максимальной прочностей песчано-жидкостекольных литейных стержней с содержанием стального порошка, улучшение их выбиваемости из отливок, а также уменьшение времени выдержки литейных стержней в среде углекислого газа и уменьшение расхода углекислого газа будут способствовать повышению конкурентоспособности песчано-жидкостекольной стержневой технологии по сравнению с более дорогостоящими и менее экологичными технологиями производства песчаных литейных стержней. Предложенное аналитическое описание влияния железного порошка на выбиваемость песчано-жидкостекольных литейных стержней позволяет в условиях производства обоснованно, с ожидаемым результатом, вводить в состав песчано-жидкостекольных стержневых смесей отходы шлифовального производства.

Список литературы

Сведения об авторах

Гутько Юрий Иванович – доктор технических наук, профессор, первый проректор, Луганский государственный университет имени Владимира Даля, Луганск, Луганская Народная Республика. E-mail: lguni.lit@yandex.ru.

Войтенко Валерий Владимирович — аспирант кафедры промышленного и художественного литья, Луганский государственный университет имени Владимира Даля, Луганск, Луганская Народная Республика. E-mail: valery.voytenko@outlook.com.

1. Mariusz Holtzer, Angelika Kmita. Mold and Core Sands in Metalcasting: Chemistry and Ecology Sustainable Development. New York City, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2020. 378 с.
2. Mikell P. Groover. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. 7th Ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2020. 816 с.
3. Srinivasan M. Science and Technology of Casting Processes. London, UK: IntechOpen, 2012. 360 с.
4. Sabine Anzualda. Metal Producing Process: A Complete Guidelines to Manufacture: Advanced Metal Casting Ppt. 2021. 154 с.
5. Ihom Paul A. Self-Curing Binder System for Core Making: A Newly Developed Self Curing Binder System for Core Making in the Foundry. Saarbrücken, Saarland, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 216 с.
6. Hartmut Polzin. Inorganic Binders: For Mould and Core Production in the Foundry. Berlin, Germany: Schiele & Schon, 2014. 336 с.
7. Burns T. A. The Foseco Foundryman's Handbook: Facts, Figures, and Formulae. 9th Ed. Amsterdam, Netherlands: Pergamon-Elsevier Science, 2017. 446 с.
8. Stephen Malkin. Grinding Technology: The Way Things Can Work: Theory and Applications of Machining with Abrasives. New York City, USA: Industrial Press, 2008. 375 с.
9. Gregory N. Haidemenopoulos. Physical Metallurgy: Principles and Design. Boca Raton, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018. 490 с.
- Harry G. Sachs. Precision Abrasive Grinding in the 21st Century: Conventional, Ceramic, Semi Superabrasive, and Superabrasive. Bloomington, Indiana, USA: Xlibris, 2010. 682 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

RESEARCH OF STRENGTH AND DESTRUCTIBILITY OF FOUNDRY LIQUID-GLASS CORES CONTAINING STEEL POWDER

Gutko Yury I. – Doctor of Technical Sciences, Professor, First Vice-Rector, Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk, Lugansk People's Republic. E-mail: lguni.lit@yandex.ru.

Voytenko Valery V. – Postgraduate Student of Industrial and Art Foundry Department, Vladimir Dahl Lugansk

State University, Lugansk, Lugansk People's Republic. E-mail: valery.voytenko@outlook.com.

Abstract. In the foundry industry, foundry sand cores made by various core-making technologies are frequently used. An increase in the requirements for the environmental friendliness of the foundry industry raises interest in the liquid-glass core-making technology, which uses eco-friendly chemical compounds as components of a core mixture, a binder, and a catalyst/hardener. In addition, the liquid-glass core-making technology can use a circulating core mixture and waste of the metallurgical, machine, mining, and wood industry. The use of finely-dispersed steel powder, which is waste of the machine industry, in the liquid-glass core-making technology is investigated by the authors of this article. The results of the comparative experimental research of the operational and ultimate structural robustness during stretching, compressing, and bending of the foundry liquid-glass core samples made by the reference core-mixture composition and the core-mixture composition containing finely-dispersed steel powder in the amount of 1...10%, as well as the comparative test results for the destructibility of such foundry cores are presented. The compositions of the investigated core mixtures and the sample-making technology for the foundry liquid-glass cores containing steel powder are described. The experimental results and the field of application for the foundry liquid-glass cores, containing finely-dispersed steel powder, are discussed.

Keywords: foundry industry, foundry core, core-making technology, core box, core mixture, composition, binder, steel powder, carbon dioxide, waste of grinding industry, destructibility, structural robustness test.

Ссылка на статью:

Гутько Ю.И., Войтенко В.В. Исследование прочности и выбиваемости песчано-жидкостекольных литейных стержней, содержащих стальной порошок // Теория и технология металлургического производства. 2022. №2(41). С. 12-17.

Gutko Y.I., Voytenko V.V. Research of strength and destructibility of foundry liquid-glass cores containing steel powder. *Teoria i tecnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 41, no. 2, pp. 12-17.