



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕСЧАНО-ЖИДКОСТЕКОВЫХ ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ

Гутько Ю.И., Войтенко В.В.

Луганский государственный университет им. В. Даля, Луганск, Луганская Народная Республика, Россия

Аннотация. Постановка задачи. Песчано-жидкостекольные литейные стержни по-прежнему широко применяются в чугунном промышленном и художественном литье вследствие доступности и простоты реализации песчано-жидкостекольного стержневого процесса, а также безопасности компонентов стержневой смеси и газообразного отвердителя для здоровья человека и окружающей среды. Совершенствование песчано-жидкостекольного стержневого процесса заключается в поиске новых добавок и рецептур стержневых смесей, а также улучшении способов отверждения литейных стержней для повышения их физико-технических характеристик и эксплуатационных качеств. В процессе изготовления металлических отливок на литейные стержни длительное время воздействуют высокие температуры, приводящие к изменению их физико-технических характеристик во времени, что влияет на качество отливок. Поэтому установление температурных зависимостей физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней различных составов является актуальной научно-технической задачей. **Цель работы.** Разработка комплексной математической модели, описывающей температурные зависимости физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней, путем усовершенствования существующих математических моделей с учетом результатов экспериментальных исследований. **Используемый метод.** Математическое моделирование температурных зависимостей физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней при воздействии высоких температур в процессе изготовления металлических отливок. **Новизна.** Предложена математическая модель, отражающая температурные зависимости физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней с учетом перспективных рецептур стержневых смесей. **Результат.** Показана возможность численного моделирования физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней при подборе рецептуры стержневой смеси для решения конкретной задачи. **Практическая значимость.** Приведены результаты численных экспериментов с использованием предложенной математической модели для исследования физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней различных составов при воздействии высоких температур с учетом тепловых процессов, протекающих в литейной форме, заполненной расплавленным металлическим литейным материалом, с установленными литейными стержнями.

Ключевые слова: литейный стержень, литейная форма, математическая модель, физико-технические характеристики, стержневая смесь, предел прочности, выбиваемость, численный эксперимент, рецептура, коэффициент газопроницаемости, газовыделение, теплоемкость, плотность, теплопроводность

© Гутько Ю.И., Войтенко В.В., 2024

Для цитирования

Гутько Ю.И., Войтенко В.В. Исследование температурных зависимостей физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 39-48. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-39-48>



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

STUDY ON TEMPERATURE DEPENDENCES FOR PHYSICAL AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF FOUNDRY SODIUM SILICATE SAND CORES

Gutko Yu.I., Voytenko V.V.

Vladimir Dal Lugansk State University, Lugansk, Lugansk People's Republic, Russia

Abstract. Problem Statement. Foundry sodium silicate sand cores are still widely used in the iron industrial and art castings due to accessibility and ease of implementation of the sodium silicate sand core-making process as well as safety of components in a core mixture and a gaseous hardener for human health and the environment. Improvement of the sodium silicate sand core-making process involves a search for new additives and compositions of core mixtures, enhancement of methods for curing foundry cores to improve their technical characteristics, physical properties, and performance qualities. During production of metal castings, foundry cores are for a long time exposed to high temperatures, resulting in changes in their technical characteristics and physical properties over time, and influencing the quality of castings. Therefore, determination of temperature dependences for physical and technical characteristics of foundry sodium silicate sand cores based on various compositions is an issue of current interest in science and technology. **Objective.** The study is aimed at developing an integrated mathematical model describing temperature dependences for physical and technical characteristics of foundry sodium silicate sand cores by improving existing mathematical models, considering results of experimental studies. **Method Applied.** The authors applied mathematical modeling of temperature dependences for physical and technical characteristics of foundry sodium silicate sand cores at high temperatures during production of metal castings. **Originality.** The paper presents a proposed mathematical model reflecting temperature dependences for physical and technical characteristics of foundry sodium silicate sand cores, considering promising compositions of core mixtures. **Result.** The paper demonstrates a possibility of numerical modeling of physical and technical characteristics of foundry sodium silicate sand cores, when choosing a composition for a core mixture to solve a specific problem. **Practical Relevance.** The paper presented results of numerical experiments using the proposed mathematical model to study physical and technical characteristics of foundry sodium silicate sand cores based on various compositions at high temperatures, considering thermal processes occurring in a foundry mold filled with a molten metallic foundry material with installed foundry cores.

Keywords: foundry core, foundry mold, mathematical model, physical and technical characteristics, core mixture, tensile strength, breakdown, numerical experiment, composition, gas permeability coefficient, outgassing rate, heat capacity, density, thermal conductivity

For citation

Gutko Yu.I., Voytenko V.V. Study on Temperature Dependences for Physical and Technical Characteristics of Foundry Sodium Silicate Sand Cores. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 39-48. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-39-48>

Введение

Стержневые процессы являются неотъемлемой частью литейного производства, поэтому они непрерывно совершенствуются вместе с литейными технологиями и литейным оборудованием. В настоящее время большинство изделий из черных и цветных металлов и сплавов предпочтительнее изготавливать путем литья вместо применения технологии механической обработки металлов и технологии обработки металлов давлением. Несмотря на широкое применение песчано-смоляных литейных стержней, где в качестве связующих веществ используются синтетические смолы, в настоящее время возобновился интерес к песчано-жидкостеклольному стержневому процессу, как наиболее доступному, простому в реализации и безопасному для здоровья человека и окружающей среды. Путем подбора рецептуры стержневой смеси и

технологии изготовления литейных стержней в значительной степени преодолены основные недостатки песчано-жидкостеклольного стержневого процесса: плохая выбиваемость литейного стержня, сравнительно длительное время набора прочности литейным стержнем и малая живучесть стержневой смеси. Это открывает новые перспективы для песчано-жидкостеклольного стержневого процесса при изготовлении отливок из черных и цветных металлов и сплавов. К тому же песчано-жидкостеклольный стержневой процесс допускает использование оборотной смеси без ухудшения качества литейных стержней, что существенно снижает экологическую нагрузку на окружающую среду по сравнению со стержневыми процессами, использующими синтетические смолы в качестве связующих веществ [1, 2].

Обширные предварительные исследования, проведенные авторами, показывают, что полученные

данные и установленные зависимости физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней от рецептуры стержневой смеси и технологии изготовления требуют систематизации в рамках общей математической модели, отражающей температурные зависимости физико-технических характеристик литейных стержней при воздействии высоких температур в процессе изготовления металлических отливок. В перспективе математическая модель может быть дополнена с учетом новых рецептов стержневых смесей и усовершенствований песчано-жидкостекольного стержневого процесса. Такая математическая модель может использоваться в численных экспериментах для исследования температурных зависимостей физико-технических характеристик песчаных литейных стержней, изготовленных с помощью других стержневых процессов, использующих органические и неорганические связующие вещества [3].

Существуют компьютерные среды для моделирования физико-технических характеристик материалов, основанные на математических моделях тепловых процессов, которые могут быть использованы для исследования и прогнозирования поведения различных материалов при высоких температурах [4]. Однако в некоторых случаях результаты, полученные с помощью универсальных математических моделей тепловых процессов, недостаточно хорошо согласуются с результатами экспериментов, направленных на выявление закономерностей поведения песчано-жидкостекольных литейных стержней различных составов при воздействии высоких температур в процессе изготовления металлических отливок [5-7].

Таким образом, существует необходимость в разработке математической модели, сочетающей достоинства существующих математических моделей и учитывающей особенности влияния высоких температур на физико-технические характеристики песчано-жидкостекольных литейных стержней, обнаруженные в ходе многочисленных экспериментальных исследований. Поэтому математическая модель должна содержать не только выражения, полученные аналитическим путем, но и уравнения регрессии, полученные по результатам экспериментальных исследований. Таким образом можно получить адекватную математическую модель, позволяющую проводить численное моделирование, результаты которого будут согласовываться с результатами экспериментальных исследований физико-технических характеристик литейных стержней, что позволит делать обоснованный выбор рецептуры и параметров песчано-жидкостекольного стержневого процесса для достижения заданных физико-технических характеристик и необходимой эксплуатационной устойчивости литейных стержней при воздействии высоких температур.

Возможность моделирования воздействия высоких температур на физико-технические характеристики и эксплуатационные качества песчано-жидко-

стекольных литейных стержней будет способствовать повышению интереса к песчано-жидкостекольному стержневому процессу, его дальнейшему совершенствованию и повышению качества отливок, изготавливаемых из черных и цветных металлов и сплавов. Проведение численных экспериментов позволит оптимизировать использование оборотной смеси в сочетании с другими компонентами стержневой смеси для достижения заданных физико-технических характеристик и эксплуатационных качеств песчано-жидкостекольных литейных стержней.

Целью работы является разработка комплексной математической модели, описывающей температурные зависимости физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней, путем усовершенствования существующих математических моделей с учетом результатов экспериментальных исследований.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные исследования физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней, направленные на установление зависимостей, необходимых для построения комплексной математической модели, проводились по традиционному методикам, выполненным в соответствии с ГОСТ 28840-90 «Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб», ГОСТ 10580-2006 «Оборудование технологическое для литейного производства» и ГОСТ 23409-78 «Пески формовочные, смеси формовочные и стержневые» [8-10].

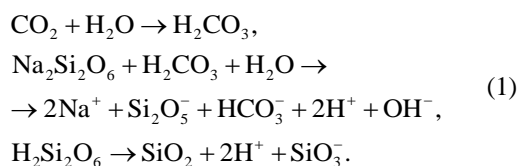
Литейные формы изготавливались с использованием формовочной смеси следующего состава: формовочный песок марки $2K_2O_3$ (ГОСТ 2138-91) – 75 мас.%; глина огнеупорная формовочная каолиновая марки М2 (ГОСТ 3226-93) – 20 мас.%; каменноугольная пыль марки ПЖ (ГОСТ 19242-73) – 5 мас.%. В качестве литейных материалов использовались алюминиевые сплавы марок АК9 и АК12, а также серый чугун марки СЧ20. Толщина стенки металлической отливки составляла 15-25 мм. Металл перегревался в печи на 30-40°C. Температура алюминиевых сплавов при заливке в литейную форму составляла 750-780°C, а температура серого чугуна – 1300-1330°C. Измерение температуры выполнялось с помощью пирометра КМ-ИТ1600 с установленным коэффициентом излучения 0,3. Объем заливаемого в литейную форму металлического расплава составлял $5,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, площадь соприкосновения расплава с литейной формой составляла $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, а площадь соприкосновения расплава с песчано-жидкостекольным литейным стержнем – $6,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

В результате воздействия высоких температур на песчано-жидкостекольный литейный стержень происходило ступенчатое термическое разложение его компонентов в следующей последовательности: химическая реакция между продуктами разложения щелочного силиката; химическая реакция между гидра-

тированной кремниевой кислотой и карбонатом натрия; химическая реакция образованного силиката с кристаллическим кварцем: $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ [11].

Вводимая в состав песчано-жидкостекольной стержневой смеси добавка – измельченная морская ракушка, представляющая собой карбонат кальция, в результате воздействия высоких температур на литейный стержень разлагается согласно химической реакции $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. В результате вышеуказанных химических преобразований происходит разрушение литейного стержня под действием высоких температур.

Образцы песчано-жидкостекольных литейных стержней изготавливались в полиэтиленовых стержневых ящиках и отверждались углекислым газом. Упрочнение литейного стержня происходило в результате следующей последовательности химических реакций:



Под действием ионов H^+ жидкое натриевое стекло образует гель кремниевой кислоты $n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$, который склеивает компоненты стержневой смеси [11].

Полученные по результатам экспериментальных исследований регрессионные модели вошли в состав рассматриваемой далее математической модели.

При построении математической модели, описывающей температурные зависимости физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней, приняты следующие допущения и упрощения. Рассматривается система «металлический расплав – литейная форма – литейный стержень», которая обменивается теплом с окружающей средой за счет конвекции и теплового излучения с внешней поверхности литейной формы. Начальным источником тепла в системе служит металлический расплав, при остывании которого теплота перераспределяется между литейной формой и литейным стержнем. Доля тепла, переходящая из металлического расплава в литейную форму и литейный стержень, зависит от отношения площадей литейной формы и литейного стержня, контактирующих с расплавом, температур приконтактных слоев и физических свойств материалов (плотности, теплоемкости и теплопроводности). Теплообменом между литейной формой и литейным стержнем пренебрегаем [12, 13].

В качестве основы для построения математической модели, описывающей температурные зависимости физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней, использована математическая модель [14]. Параметры математической модели, их обозначения и размерности представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры математической модели
Table 1. Mathematical model parameters

| Параметр | Обозначение |
|---|---------------------------|
| Характеристический размер литейного стержня | h_s , м |
| Характеристический размер стенки литейной формы | h_f , м |
| Характеристический размер внешней поверхности литейной формы | g_f , м |
| Характеристический размер внутренней поверхности литейной формы | l_f , м |
| Площадь поверхности литейного стержня | S_s , м ² |
| Площадь внешней поверхности литейной формы | S_{fs} , м ² |
| Площадь внутренней поверхности литейной формы | S_{fj} , м ² |
| Температура литейного стержня в начальный момент времени | T_{s0} , °C |
| Температура окружающей воздушной среды | T_0 , °C |
| Степень черноты литейного стержня | a_s |
| Степень черноты литейной формы | a_f |

В следующих расчетах используются аппроксимационные выражения, отражающие зависимости теплофизических величин для литейного стержня, литейной формы и металлического расплава от температуры T , °C, полученные авторами.

Коэффициент теплопроводности литейного стержня, Вт/(м · °C), состоящего из формовочного кварцевого песка марки 2К04А с модулем крупности 315-630 мкм, жидкого натриевого стекла с силикатным модулем 2,31-2,60 и плотностью 1,47-1,52 г/см³, а также измельченной морской ракушки

$$\begin{aligned} K_s(T) &= K_a(a) + 6 \cdot 10^{-4} \cdot T, \\ K_a(a) &= 0,6894 - 0,0248 \cdot a + 5,7029 \cdot a^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где a – массовая доля измельченной морской ракушки в стержневой смеси, мас. %.

Плотность литейного стержня, кг/м³,

$$\rho_s(T) = 1920 - 0,042 \cdot T. \quad (3)$$

Теплоемкость литейного стержня, Дж/(кг · °C),

$$\begin{aligned} C_s(T) &= C_a(a) + 25 \cdot 10^{-3} \cdot T, \\ C_a(a) &= 417,53 + 28,46 \cdot a - 0,24 \cdot a^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где a – массовая доля измельченной морской ракушки в стержневой смеси, мас. %.

Коэффициент теплопроводности литейной формы, Вт/(м · °C),

$$K_f(T) = 0,17 - 0,15 \cdot 10^{-4} \cdot T. \quad (5)$$

Плотность материала литейной формы, кг/м³,

$$\rho_f(T) = 1633 - 0,034 \cdot T. \quad (6)$$

Теплоемкость материала литейной формы, Дж/(кг · °С),

$$C_f(T) = 843 + 6,35 \cdot 10^{-2} \cdot T. \quad (7)$$

Предел прочности литейного стержня при растяжении, МПа,

$$\sigma_1(T) = b - c \cdot T + d \cdot T^2. \quad (8)$$

В табл. 2 приведены коэффициенты уравнения для расчета предела прочности песчано-жидкостеклового литейного стержня при растяжении.

Предел прочности литейного стержня при сжатии, МПа,

$$\begin{aligned} \sigma_2(T) &= \sigma_a(a) - 1,32 \cdot 10^{-3} \cdot T + 2,4 \cdot 10^{-6} \cdot T^2, \\ \sigma_a(a) &= 2,25 - 0,062 \cdot a. \end{aligned} \quad (9)$$

Предел прочности литейного стержня при изгибе, МПа,

$$\begin{aligned} \sigma_3(T) &= \sigma_a(a) - 1,48 \cdot 10^{-3} \cdot T + 2,73 \cdot 10^{-6} \cdot T^2, \\ \sigma_a(a) &= 1,22 - 0,068 \cdot a. \end{aligned} \quad (10)$$

Коэффициент газопроницаемости литейного стержня, Д (дарси),

$$M(a) = 7,92 + 0,881 \cdot a. \quad (11)$$

Температурная зависимость коэффициента газопроницаемости литейного стержня, Д,

$$M(T) = 7,46 + 2,28 \cdot 10^{-2} \cdot T. \quad (12)$$

Температурная зависимость коэффициента газопроницаемости литейного стержня с оптимальной массовой долей измельченной морской ракушки, равной 15 мас.%, Д,

$$M(T) = 15,57 + 9,12 \cdot 10^{-3} \cdot T. \quad (13)$$

Зависимость газовой выделенности из объема литейного стержня от массовой доли измельченной морской ракушки, м³/м³,

$$V(a) = 8,01 - 0,614 \cdot a + 1,21 \cdot 10^{-2} \cdot a^2. \quad (14)$$

Зависимость газовой выделенности из объема литейного стержня, содержащего 10 мас.% измельченной морской ракушки, от массовой доли оборотной смеси, м³/м³,

$$V(b) = 6,81 - 0,146 \cdot b + 2,87 \cdot 10^{-4} \cdot b^2, \quad (15)$$

где b – массовая доля оборотной смеси в стержневой смеси, мас.%,

Выбиваемость литейного стержня, балл,

$$B(T) = 9,82 - 3,48 \cdot 10^{-3} \cdot T. \quad (16)$$

Применена десятибалльная шкала выбиваемости, введенная авторами, в которой наилучшей выбиваемости соответствует 0 баллов, а наихудшей – 10 баллов.

В следующих расчетах используются аппроксимационные выражения, отражающие зависимости теплофизических величин для воздуха, полученные авторами с использованием табличных значений источников [5-7].

Теплоемкость воздуха, Дж/(кг · °С),

$$C_0(T) = 984 + 0,218 \cdot T - 7,36 \cdot 10^{-6} \cdot T^2. \quad (17)$$

Коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м · °С),

$$K_0(T) = 2,52 \cdot 10^{-2} + 7,42 \cdot 10^{-5} \cdot T - 1,98 \cdot 10^{-8} \cdot T^2. \quad (18)$$

Динамическая вязкость воздуха, Па · с,

$$\eta_0(T) = 1,79 \cdot 10^{-5} + 4,25 \cdot 10^{-8} \cdot T - 1,18 \cdot 10^{-11} \cdot T^2. \quad (19)$$

Кинематическая вязкость воздуха, м²/с,

$$\nu_0(T) = 1,16 \cdot 10^{-5} + 1,05 \cdot 10^{-7} \cdot T + 6,07 \cdot 10^{-11} \cdot T^2. \quad (20)$$

Моделирование тепловых процессов, протекающих в литейной форме при заполнении литейной полости металлическим расплавом, а также связанных с ними физико-технических характеристик песчано-жидкостеклового литейного стержня, выполнено в следующем порядке.

Удельная изобарная теплоемкость литейного стержня, Дж/(м³ · °С),

$$C_{si}(T) = \rho_s(T) \cdot C_s(T). \quad (21)$$

Таблица 2. Коэффициенты уравнения для расчета предела прочности $\sigma_1(T)$
Table 2. Coefficients of the equation used to calculate tensile strength $\sigma_1(T)$

| Состав литейного стержня, мас.% | | | Коэффициенты уравнения | | |
|---------------------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| Формовочный кварцевый песок | Жидкое натриевое стекло | Измельченная морская ракушка | b | c | d |
| 85 | 15 | 0 | 1,90 | $3,55 \cdot 10^{-3}$ | $2,54 \cdot 10^{-6}$ |
| 75 | 15 | 10 | 1,06 | $8,54 \cdot 10^{-4}$ | $7,53 \cdot 10^{-7}$ |
| 70 | 15 | 15 | $8,95 \cdot 10^{-1}$ | $2,02 \cdot 10^{-3}$ | $1,69 \cdot 10^{-6}$ |
| 60 | 15 | 25 | $7,84 \cdot 10^{-1}$ | $8,21 \cdot 10^{-4}$ | $2,52 \cdot 10^{-7}$ |

Температуропроводность литейного стержня, $\text{м}^2/\text{с}$,

$$L_s(T) = \frac{K_s(T)}{C_{si}(T)}. \quad (22)$$

Избыточное количество теплоты в системе «металлический расплав – литейная форма – литейный стержень» в момент времени t , Дж,

$$Q(t) = C_r(t) \cdot m_r \cdot (T_r(t) - T_0), \quad (23)$$

где C_r – удельная теплоемкость расплава, Дж/(кг · °С); m_r – масса расплава, кг; $T_r(t)$ – температура расплава, измеряемая в процессе остывания, °С.

Доля теплоты, переходящая из металлического расплава в литейный стержень,

$$k_1 = A + (1 - A) \cdot k_T, \quad A = k_k + (1 - k_k) \cdot k_s, \\ k_k = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_s \cdot C_s \cdot K_s}{\rho_f \cdot C_f \cdot K_f} \right)^{\frac{1}{2}}}, \\ k_s = \left(\frac{S_s}{S_s + S_f} \right)^m, \\ k_T = \left(\frac{T_f}{T_s + T_f} \right)^n, \quad (24)$$

где показатели степени m и $n = 0,9-1,0$.

Доля теплоты, переходящая из металлического расплава в литейную форму,

$$k_2 = 1 - k_1. \quad (25)$$

Плотность теплового потока из металлического расплава в литейный стержень, $\text{Вт}/\text{м}^2$,

$$q_s(t) = \frac{k_1(t) \cdot (Q(t - \tau) - Q(t))}{\tau \cdot S_s}, \quad (26)$$

где τ – шаг изменения температуры расплава, с.

Вводим безразмерное относительное время:

$$t_o = \frac{L_s \cdot t}{h_s^2}. \quad (27)$$

Вводим безразмерную относительную температуру:

$$R_1(t) = t_o + \frac{h^2}{2} - \frac{1}{6} + \frac{2}{\pi^2} \cdot \cos(\pi \cdot h) \cdot \exp(-p^2 \cdot t_o), \quad (28)$$

где h – безразмерная координата по толщине литейного стержня; p – первый корень характеристического уравнения.

Число Рейнольдса для внешней поверхности литейной формы

$$Re_f(t) = \frac{\rho_0 \cdot v_0(t) \cdot g_f}{\eta_0}, \quad (29)$$

где $v_0(t)$ – скорость воздушных потоков над поверхностью литейной формы, м/с.

Число Прандтля

$$Pr_f = \frac{\eta_0 \cdot C_0}{K_0}. \quad (30)$$

В следующих расчетах используются корреляционные соотношения между характеристическим размером внешней поверхности литейной формы и скоростью конвекционного воздушного потока.

Коэффициент теплопередачи при внешней конвекции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$, с учетом того, что $Re_f \leq 5 \cdot 10^5$, определяется по формуле

$$\alpha(t) = \frac{2 \cdot K_0}{g_f} \cdot \frac{0,3387 \cdot (Pr_f)^{\frac{1}{3}} \cdot (Re_f(t))^{\frac{1}{2}}}{\left(1 + \left[\frac{0,0468}{Pr_f(T)} \right]^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{1}{4}}}. \quad (31)$$

Внешний конвективный тепловой поток в направлении нормали к поверхности литейной формы, $\text{Вт}/\text{м}^2$,

$$q_{f2}(t) = \alpha(t) \cdot (T_f(t) - T_0), \quad (32)$$

где $T_f(t)$ – средняя температура литейной формы в момент времени t , °С.

Поток мощности теплового излучения с поверхности литейной формы, $\text{Вт}/\text{м}^2$,

$$q_{f3}(t) = a_f \cdot \sigma \cdot \left([T_f(t) + 273]^4 - [T_0 + 273]^4 \right), \quad (33)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\text{кг}/(\text{с}^3 \cdot \text{К}^4)$.

Тепловой поток, идущий на нагрев литейной формы, $\text{Вт}/\text{м}^2$,

$$q_{f1}(t) = q_f(t) - q_{f2}(t) - q_{f3}(t). \quad (34)$$

Средняя температура литейного стержня в момент времени t , °С,

$$T_s(t) = \frac{R_s(t) \cdot q_s(t) \cdot h_s}{K_s(t)} + T_s(t - \tau). \quad (35)$$

Переход от безразмерного времени t_0 к t , с:

$$t = \frac{t_0 \cdot h_s^2}{L_s} \quad (36)$$

Энергия, рассеиваемая конвекцией с внешней поверхности литейной формы за время τ , Дж,

$$w_{f2}(t) = q_{f2}(t) \cdot S_{f1} \cdot \tau \quad (37)$$

Энергия, идущая на нагрев литейного стержня за время τ , Дж,

$$w_s(t) = q_s(t) \cdot S_s \cdot \tau \quad (38)$$

Энергия, рассеиваемая тепловым излучением с внешней поверхности литейной формы за время τ , Дж,

$$w_{f3}(t) = q_{f3}(t) \cdot S_{f1} \cdot \tau \quad (39)$$

Суммарная энергия, рассеиваемая конвекцией с наружной поверхности литейной формы за время кристаллизации металлического расплава t_k , Дж,

$$w_{f2\Sigma} = S_{f1} \int_0^{t_k} q_{f2}(t) dt \quad (40)$$

Суммарная энергия, идущая на нагрев литейного стержня за время кристаллизации металлического расплава, Дж,

$$w_{s\Sigma} = S_s \int_0^{t_k} q_s(t) dt \quad (41)$$

Суммарная энергия, рассеиваемая тепловым излучением с внешней поверхности литейной формы за время кристаллизации металлического расплава, Дж,

$$w_{f3\Sigma} = S_{f1} \int_0^{t_k} q_{f3}(t) dt \quad (42)$$

Температура литейного стержня в момент времени t , °C, с учетом его объема V_s ,

$$T_s(t) = \frac{R_s(t) \cdot q_s(t) \cdot h_s}{K_s(t)} + T_s(t - \tau) + \frac{q_s(t)}{\rho_s(t) \cdot C_s(t) \cdot V_s} \quad (43)$$

Полученные результаты и их обсуждение

Далее, согласно вышеприведенным формулам, выполняется расчет коэффициента газопроницаемости, газовыделения, выбиваемости, а также пределов прочностей песчано-жидкостекольного литейного стержня при растяжении, сжатии и изгибе в зависимости от температуры в момент времени t . В качестве примера приведены результаты численного эксперимента, полученные с помощью предложенной математической модели.

На **рис. 1** приведены временные зависимости пределов прочностей песчано-жидкостекольных литейных стержней с разными массовыми долями измельченной морской ракушки (0, 10, 15 и 25 мас.%) при растяжении. Графики показывают динамику изменения во времени предела прочности литейного стержня при растяжении, начиная с момента окончания заполнения литейной полости металлическим расплавом, с учетом параметров литейной формы, литейного стержня и металлического расплава. По результатам численного эксперимента можно сделать вывод, достаточной ли прочностью будет обладать литейный стержень в определенный момент времени для предотвращения преждевременного разрушения.

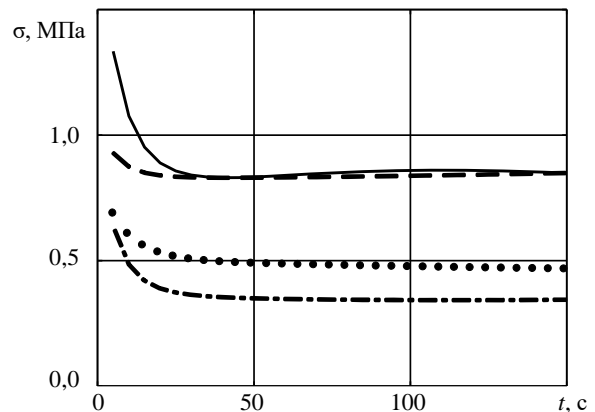


Рис. 1. Временные зависимости пределов прочностей песчано-жидкостекольных литейных стержней с разными массовыми долями измельченной морской ракушки при растяжении:
— 0 мас.%; --- 10 мас.%; - · - 15 мас.%;
• - 25 мас.%

Fig. 1. Time dependences for tensile strength of foundry sodium silicate sand cores with different mass fractions of crushed seashells under tension:
- is 0 wt %; --- is 10 wt %; - · - is 15 wt %;
• is 25 wt %

По временным зависимостям коэффициентов газопроницаемости песчано-жидкостекольных литейных стержней (**рис. 2**) можно судить о газопроницаемости литейных стержней различных составов и сделать вывод о необходимости наличия каналов отвода углекислого газа и водяного пара, образующихся в объеме литейного стержня.

По временным зависимостям газовыделений из объемов песчано-жидкостекольных литейных стержней (**рис. 3**) можно судить о динамике выделения углекислого газа и водяного пара и по этим значениям подобрать размеры каналов газоотведения для литейных стержней различных составов.

Аналогичным образом можно прогнозировать выбиваемость песчано-жидкостекольных литейных стержней различных составов.

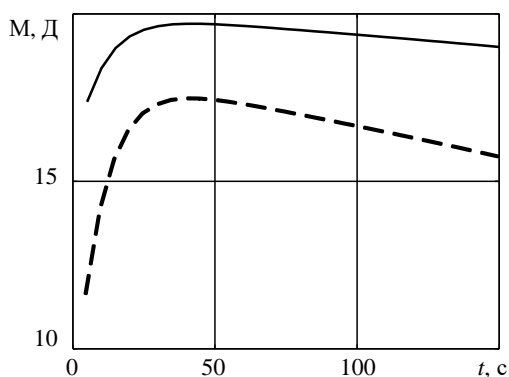


Рис. 2. Временные зависимости коэффициентов газопроницаемости песчано-жидкостекольных литейных стержней с разными массовыми долями измельченной морской ракушки: — 10 мас.%; --- 0 мас.%

Fig. 2. Time dependences for gas permeability coefficients of foundry sodium silicate sand cores with different mass fractions of crushed seashells: — is 10 wt %; --- is 0 wt %

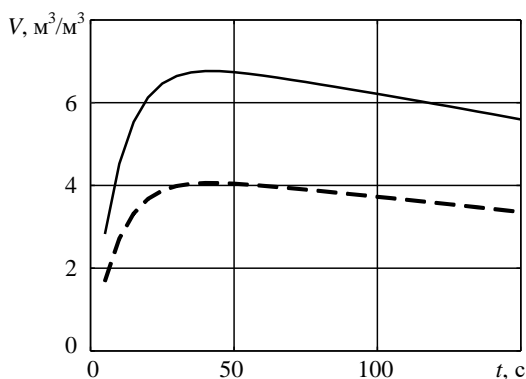


Рис. 3. Временные зависимости газовыделений из объемов песчано-жидкостекольных литейных стержней с разными массовыми долями измельченной морской ракушки: --- 0 мас.%; — 15 мас.%

Fig. 3. Time dependences of outgassing rates for volumes of foundry sodium silicate sand cores with different mass fractions of crushed seashells: — is 0 wt %; --- is 15 wt %

Заключение

По результатам экспериментальных и теоретических исследований разработана математическая модель, отражающая температурные зависимости физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней перспективных составов с учетом параметров литейной формы, литейного стержня, металлического расплава и окружающей воздушной среды. Предложенная математическая модель систематизирует ранее полученные экспериментальные зависимости некоторых физико-технических характеристик литейных стержней и, таким образом, позволяет проводить численные эксперименты для различных комбинаций входных парамет-

ров, существенно упрощая дальнейшие исследования, направленные на поиск наилучшего сочетания параметров песчано-жидкостекольного стержневого процесса для достижения требуемых физико-технических характеристик литейных стержней при воздействии высоких температур в процессе изготовления металлических отливок.

Результаты численного эксперимента, полученные с использованием предложенной математической модели, демонстрируют возможность прогнозирования физико-технических характеристик литейных стержней различных составов с учетом параметров литейной формы, литейного стержня, металлического расплава и окружающей воздушной среды. Полученные данные позволяют делать обоснованный выбор рецептуры стержневой смеси и параметров технологического процесса, а также могут служить основой для дальнейших исследований, направленных на усовершенствование литейных технологий и литейного оборудования. Вошедшие в состав математической модели регрессионные модели, полученные экспериментально, сами по себе представляют практическую ценность.

Список источников

1. Рольф Р. Литейные технологии: учебник. Нур-Султан: Фолиант, 2019. 408 с.
2. Holtzer M., Kmita A. Mold and Core Sands in Metalcasting: Chemistry and Ecology Sustainable Development. New York City, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2020. 378 с.
3. Groover M.P. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. 7th Ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2020. 816 с.
4. Heat Transfer Module User's Guide. Burlington, Massachusetts, USA: COMSOL, 2019. 788 p. URL: <https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.heat/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf> (дата обращения: 27.01.2024).
5. 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. URL: <http://ttmp.magtu.ru/doc/2022/2/12-17.pdf> (дата обращения: 27.01.2024).
6. Гутько Ю.И., Войтенко В.В. Исследования выбиваемости и газовыделения песчаных литейных стержней на органическом связующем веществе // Настоящее и будущее современных научных направлений: сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. (13 июня 2022 г.). Кемерово: Западно-Сибирский научный центр, 2022. С. 70-73. URL: https://www.sibscience-new.ru/images/doc_temp/2022/Sbornik_13_06_22.pdf (дата обращения: 27.01.2024).
7. Гутько Ю.И., Войтенко В.В. Исследование выбиваемости жидкостекольных литейных стержней // Настоящее и будущее современных научных направлений: сб. матер. Междунар. науч.-практ.

- конф. (18 мая 2021 г.). Кемерово: Западно-Сибирский научный центр, 2021. С. 14-17. URL: https://www.sibscience-new.ru/images/doc_temp/18_05.pdf (дата обращения: 27.01.2024).
8. ГОСТ 28840-90. Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования = Machines for Tension, Compression, and Bending Testing of Materials. General Technical Requirements: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 29 декабря 1990 № 3530: введен впервые: дата введения: 01.01.1993. М.: Изд-во стандартов, 2004. 8 с. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294852/4294852156.pdf> (дата обращения: 27.01.2024).
 9. ГОСТ 10580-2006. Оборудование технологическое для литейного производства. Общие технические условия = Technological Equipment for Foundry. General Technical Conditions: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 4 сентября 2007 г. №233: введен впервые: дата введения: 01.01.2008. М.: Стандартиформ, 2009. 23 с. URL: <https://meganorm.ru/Data/56/5694.pdf> (дата обращения: 27.01.2024).
 10. ГОСТ 23409-78. Пески формовочные, смеси формовочные и стержневые = Moulding Sands, Moulding and Core Sand Mixtures: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 27 декабря 1978 г. №3489: введен впервые: дата введения: 01.01.1980 М.: Изд-во стандартов, 1995. 3 с. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294830/4294830675.pdf> (дата обращения: 27.01.2024).
 11. Тютина Е.А. Разработка технологии получения легковыбываемых жидкостекольных стержневых смесей: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.04. РГБ ОД, 61:06-5/1944. Комсомольск-на-Амуре, 2006. 173 с.
 12. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Наука, 1972. 720 с.
 13. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов: Справочное руководство. М.: Физматгиз, 1959. 356 с.
 14. Codina R. Comparison of Some Finite Element Methods for Solving the Diffusion-Convection-Reaction Equation // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. Amsterdam: Elsevier. 1998, no. 156, pp. 185-210. DOI: 10.1016/S0045-7825(97)00206-5.
 2. Holtzer M., Kmita A. Mold and core sands in metal-casting: Chemistry and ecology: Sustainable development. New York City, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2020, 378 p.
 3. Groover M.P. Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems. 7th ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2020, 816 p.
 4. Heat Transfer Module User's Guide. Burlington, Massachusetts, USA: COMSOL, 2019, 788 p. Available at: <https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.heat/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf> (Accessed on January 27, 2024).
 5. Gutko Yu.I., Voytenko V.V. Research of strength and breakdown of foundry liquid-glass cores containing steel powder. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and Technology of Metallurgical Production]. 2022;(2(41)):12-17. (In Russ.) Available at: <http://ttmp.magtu.ru/doc/2022/2/12-17.pdf> (Accessed on January 27, 2024).
 6. Gutko Yu.I., Voytenko V.V. Studies on breakdown and outgassing rates of foundry sand cores using an organic binder. *Nastoyashchee i budushchee sovremennykh nauchnykh napravleniy: Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Present and Future of Contemporary Scientific Fields: Collection of papers of the International Scientific and Practical Conference]. Kemerovo: West Siberian Scientific Center, 2022, pp. 70-73. Available at: https://www.sibscience-new.ru/images/doc_temp/2022/Sbornik_13_06_22.pdf (Accessed on January 27, 2024).
 7. Gutko Yu.I., Voytenko V.V. Research of breakdown of foundry liquid-glass cores. *Nastoyashchee i budushchee sovremennykh nauchnykh napravleniy: Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Present and Future of Contemporary Scientific Fields: Collection of papers of the International Scientific and Practical Conference]. Kemerovo: West Siberian Scientific Center, 2021, pp. 14-17. Available at: https://www.sibscience-new.ru/images/doc_temp/18_05.pdf (Accessed on January 27, 2024).
 8. State Standard GOST 28840-90. *Mashiny dlya ispytaniya materialov na rastyazhenie, szhatie i izgib. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [Machines for tension, compression, and bending testing of materials. General technical requirements]. Moscow: Izdatelstvo standartov, 2004, 8 p. (In Russ.) Available at: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294852/4294852156.pdf> (Accessed on January 27, 2024).
 9. State Standard GOST 10580-2006. *Oborudovanie tekhnologicheskoe dlya liteinogo proizvodstva. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [Technological equipment for foundry. General technical conditions]. Moscow: Izdatelstvo standartov, 2009, 23 p. (In Russ.) Available at: <https://meganorm.ru/Data/56/5694.pdf> (Accessed on January 27, 2024).
 10. State Standard GOST 23409-78. *Peski formovochnye, smesi formovochnye i sterzhnevyye* [Moulding sands, moulding and core sand mixtures]. Moscow: Iz-

References

1. Rolf R. *Liteynye tekhnologii: Uchebnik* [Foundry technologies: textbook]. Nur-Sultan: Foliant, 2019, 408 p. (In Russ.)

- datelstvo standartov, 1995, 3 p. (In Russ.) Available at: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294830/4294830675.pdf> (Accessed on January 27, 2024).
11. Tyutina E.A. *Razrabotka tekhnologii polucheniya legkovybivaemykh zhidkostekolnykh sterzhnevnykh smesey: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of the technology for producing of easily knocked out sodium silicate core mixtures. PhD thesis]. Komsomolsk-on-Amur, 2006, 173 p. (In Russ.)
 12. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Handbook of thermo-physical properties for gases and liquids]. Moscow: Nauka, 1972, 720 p. (In Russ.)
 13. Chirkin V.S. *Teplofizicheskie svoystva materialov: Spravochnoe rukovodstvo* [Thermophysical properties of materials: reference guide]. Moscow: Fizmatgiz, 1959, 356 p. (In Russ.)
 14. Codina R. Comparison of some finite element methods for solving the diffusion-convection-reaction equation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Amsterdam: Elsevier, 1998;156:185-210. DOI: 10.1016/S0045-7825(97)00206-5.

Поступила 07.11.2023; принята к публикации 27.01.2024; опубликована 28.03.2024
Submitted 07/11/2023; revised 27/01/2024; published 28/03/2024

Гутько Юрий Иванович – доктор технических наук, профессор, первый проректор, Луганский государственный университет им. В. Даля, Луганск, Луганская Народная Республика, Россия.
Email: lguni.lit@yandex.ru.

Войтенко Валерий Владимирович – аспирант, кафедра цифровых технологий и машин в литейном производстве, Луганский государственный университет им. В. Даля, Луганск, Луганская Народная Республика, Россия.
Email: valery.voytenko@outlook.com. ORCID 0009-0004-0267-5068

Yury I. Gutko – DrSc (Eng.), Professor, First Vice-Rector, Vladimir Dal Lugansk State University, Lugansk, Lugansk People’s Republic, Russia.
Email: lguni.lit@yandex.ru.

Valery V. Voytenko – postgraduate student, Department of Digital Technologies and Machines in Foundry, Vladimir Dal Lugansk State University, Lugansk, Lugansk People’s Republic, Russia.
Email: valery.voytenko@outlook.com. ORCID 0009-0004-0267-5068