

# ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

## FOUNDRY

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 621.743.42  
DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-29-35



## СПОСОБ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОСТЕКОЛЬНОЙ СТЕРЖНЕВОЙ СМЕСИ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ

Гутько Ю.И., Войтенко В.В.

Луганский государственный университет имени В. Даля, Луганск

**Аннотация.** Постановка задачи. Качество отливок определяется качеством изготовления литейных форм и литейных стержней. Жидкостекольная стержневая технология является одной из наиболее доступных, дешевых и экологичных технологий, благодаря чему к ней в настоящее время возобновился интерес. Эта технология имеет ряд недостатков, которые делают ее менее конкурентоспособной по сравнению с другими стержневыми технологиями в основном по критериям стабильности качества и технологичности. Жидкостекольная стержневая смесь обладает сравнительно малым временем живучести; ее технологические параметры заметно зависят от химического состава, силикатного модуля и плотности используемого жидкого стекла, а также от рецептуры, температуры и влажности, что оказывает заметное влияние на качество жидкостекольных литейных стержней в процессе их изготовления. Контроль параметров стержневой смеси в процессе ее приготовления и использования позволит повысить качество жидкостекольных литейных стержней. Цель. Разработка способа контроля параметров жидкостекольной стержневой смеси в процессе ее приготовления и применения на стержневом участке литейного цеха. Используемые методы. Математическое моделирование распространения и отражения акустических волн в исследуемых средах, планирование экспериментов, проведение экспериментов в лабораторных условиях, статистическая обработка данных и сравнительный анализ результатов исследований. Новизна. Предложен способ контроля технологических параметров жидкостекольной стержневой смеси: средней плотности, живучести, процентного содержания жидкого стекла и добавок. Результаты. Показана возможность применения предложенного способа контроля для осуществления экспресс-контроля в условиях стержневого производства, который имеет высокое быстродействие и достаточную точность. Практическая значимость. Приведены результаты экспериментальной проверки предложенного способа контроля параметров жидкостекольных стержневых смесей с различным процентным содержанием жидкого стекла и добавок, отражающие особенности взаимодействия акустических волн со стержневыми смесями различных рецептур. Обсуждаются результаты эксперимента и возможности предложенного способа контроля для стержневого производства.

**Ключевые слова:** жидкостекольный литейный стержень, стержневая смесь, рецептура, живучесть, плотность стержневой смеси, способ контроля, акустическая волна, амплитуда акустической волны, поглощение, отражение, пьезоэлектрический преобразователь, эксперимент, зависимость.

© Гутько Ю.И., Войтенко В.В., 2021

### Для цитирования

Гутько Ю.И., Войтенко В.В. Способ контроля параметров жидкостекольной стержневой смеси в процессе ее приготовления и применения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 29–35. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-29-35>



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

## MONITORING OF SODIUM SILICATE CORE SAND MIXTURE PARAMETERS DURING PRODUCTION AND APPLICATION

Gutko Yu.I., Voytenko V.V.

Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk

**Abstract. Problem Statement.** The quality of castings depends on the quality of manufacturing foundry molds and cores. The sodium silicate core-making technology is one of the most available, cheap, and eco-friendly technologies, so it is of current interest. This technology has some disadvantages making it less competitive in contrast with other core-making technologies on the quality stability and manufacturability. The sodium silicate core mixture has a comparatively short durability; its technological parameters significantly depend on a chemical composition, a silicate module, and density of used sodium silicate, as well as on a composition, temperature, and moisture, that has a significant effect on the quality of sodium silicate cores during the core-making process. Monitoring core mixture parameters during production and application will contribute to improving the quality of sodium silicate cores. **Objective.** The research is aimed at developing a method used to monitor parameters of the sodium silicate core mixture during its production and application at the core manufacturing department of a foundry shop. **Methods Applied:** mathematical modeling of the acoustic wave distribution and reflection in media under study, planning of experiments, laboratory-scale experiments, statistical data processing and a comparative analysis of the experimental results. **Originality.** The paper describes a suggested method used to monitor technological parameters of the sodium silicate core mixture: average density, durability, the percentage of sodium silicate and additives. **Results.** The paper gives a potential application of the suggested express control method for the core-making process due to high performance and a satisfactory precision. **Practical Relevance.** The paper presents results of the experimental verification of the suggested parameter control method for sodium silicate core mixtures with various percentages of sodium silicate and additives, which represent the interaction peculiarities of acoustic waves with core mixtures of various compositions. The paper discusses experimental results and potentials of the suggested control method for the core-making technology.

**Keywords:** foundry sodium silicate core, core mixture, composition, durability, core mixture density, control method, acoustic wave, acoustic amplitude, absorption, reflection, piezoelectric transducer, experiment, dependence.

### For citation

Gutko Yu.I., Voytenko V.V. Monitoring of Sodium Silicate Core Sand Mixture Parameters During Production and Application. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 4, pp. 29–35. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-29-35>

### Введение

Активное развитие литейного производства направлено на экономию стержневых и формовочных материалов, а также на снижение сопутствующих энергозатрат. Развиваются различные типы литья, включая литье по выплавляемым моделям, литье под действием силы тяжести, литье в песчаные формы и литье под давлением [1]. Наблюдается тенденция к увеличению доли производства алюминия и связанных с ним технологий легких металлов для машиностроения, автомобильного и железнодорожного транспорта, а также для авиации [2, 3]. Повышается внимание к экологичности литейного производства в целом, а также к снижению выбросов химических соединений при приготовлении стержневых и формовочных смесей, заливке литейных форм расплавленным металлом, охла-

ждении литейных форм и выбивке отливок из них [4]. Оцениваются последствия утилизации отработанных стержневых и формовочных песков, а также влияние отработанных песков на окружающую среду в процессе их хранения [5]. Это, в частности, вызывает повышенный интерес к жидкостекольной стержневой технологии, характеризующейся экологичностью, а также дешевизной и доступностью компонентов стержневой смеси.

Продолжается систематизация литейных и стержневых технологий, а также выработка рекомендаций по изготовлению отливок всеми распространенными методами литья, включая новые и наиболее перспективные технологии с позиции наличия значительных резервов для дальнейшего их развития [6, 7]. Достаточно часто в условиях стержневого участка литейного цеха изготовление стержневой смеси произво-

дится непрерывно либо циклически, поэтому осуществление контроля рецептуры, живучести и качества перемешивания компонентов стержневой смеси является весьма важным условием для получения литейных стержней и впоследствии отливок стабильного качества [8, 9]. В особенности это относится к имеющейся перспективе дальнейшего усовершенствования жидкостекольной стержневой технологии. Эксплуатационные характеристики жидкостекольных литейных стержней во многом зависят от постоянства рецептуры стержневой смеси, имеющей сравнительно небольшую живучесть – порядка 30–60 мин, свойства которой в значительной мере зависят от ее химического состава и количества вводимых в нее добавок, а также от состава (силикатного модуля) и плотности жидкого стекла [10]. Поэтому разработка способов осуществления контроля технологических параметров жидкостекольной стержневой смеси в условиях стержневого участка является актуальной научно-технической задачей, имеющей практическую ценность.

Авторами предложен способ контроля наиболее важных технологических параметров жидкостекольной стержневой смеси, основанный на отражении акустических волн, распространяющихся в воздушной среде, от поверхности стержневой смеси. Суть предложенного способа контроля заключается в следующем. Акустическая волна, падая на поверхность стержневой смеси, частично поглощается стержневой смесью и частично отражается от нее. Коэффициент отражения акустической волны от поверхности стержневой смеси определяется следующими факторами: частотой акустической волны, углом падения волны и средней плотностью стержневой смеси. Таким образом, при заданных величинах частоты акустической волны и угла падения на поверхность стержневой смеси амплитуда отраженного сигнала будет зависеть от средней плотности стержневой смеси и способности поглощать звуковые колебания. Средняя плотность стержневой смеси в процессе ее приготовления уменьшается по мере перемешивания ее компонентов. При этом стержневая смесь становится более рыхлой. Таким образом, по амплитуде отраженной акустической волны можно контролировать степень готовности стержневой смеси к применению. С течением времени в жидкостекольной стержневой смеси протекают химические и физические процессы, приводящие к ее упрочнению, увеличению ее

плотности и снижению ее живучести. Увеличение плотности стержневой смеси приводит к увеличению амплитуды акустической волны, отраженной от поверхностного слоя стержневой смеси, по величине которой можно осуществлять контроль живучести стержневой смеси при ее использовании. Различные добавки, вводимые в стержневую смесь, по-разному изменяют ее среднюю плотность: добавки с малой плотностью снижают среднюю плотность стержневой смеси, а добавки с большой плотностью – увеличивают.

### Полученные результаты и их обсуждение

Предварительные лабораторные и численные эксперименты, проведенные авторами, позволили установить общие закономерности распространения, отражения и поглощения акустических волн звукового и ультразвукового диапазона на границах раздела сред «металл – стержневая смесь» и «воздух – стержневая смесь». В общем виде была получена зависимость между амплитудой акустической волны, отраженной от поверхностного слоя стержневой смеси, и другими параметрами стержневой смеси, которая может быть описана выражением следующего вида:

$$A(t) = A_0 \cdot (G(t) \cdot k_g + J(t) \cdot k_j - S \cdot k_s + C \cdot k_c - H \cdot k_h - F \cdot k_{fe} - f \cdot k_f - \alpha \cdot k_\alpha), \quad (1)$$

где  $A(t)$  – амплитуда акустического давления акустической волны, отраженной от поверхностного слоя стержневой смеси, Па;  $A_0$  – амплитуда акустического давления падающей акустической волны, Па;  $G(t)$  – степень готовности стержневой смеси, %;  $k_g$  – нормирующий коэффициент степени готовности стержневой смеси,  $\%^{-1}$ ;  $J(t)$  – степень живучести стержневой смеси, %;  $k_j$  – нормирующий коэффициент степени живучести стержневой смеси,  $\%^{-1}$ ;  $S$  – содержание в стержневой смеси жидкого стекла, %;  $k_s$  – нормирующий коэффициент содержания в стержневой смеси жидкого стекла,  $\%^{-1}$ ;  $C$  – содержание в стержневой смеси каменного угля, древесного угля или древесных опилок, %;  $k_c$  – нормирующий коэффициент содержания в стержневой смеси углерода,  $\%^{-1}$ ;  $H$  – содержание в стержневой смеси металлургического шлака, %;  $k_h$  – нормирующий коэффициент содержания

в стержневой смеси металлургического шлака, %<sup>-1</sup>;  $F$  – содержание в стержневой смеси стального порошка, %;  $k_{fe}$  – нормирующий коэффициент содержания в стержневой смеси железа, %<sup>-1</sup>;  $f$  – частота акустической волны, Гц;  $k_f$  – коэффициент поглощения акустической волны в воздухе, Гц<sup>-1</sup>;  $\alpha$  – угол падения акустической волны на поверхность стержневой смеси, отсчитанный от перпендикуляра к границе раздела сред, рад;  $k_a$  – коэффициент угла падения акустической волны, рад<sup>-1</sup>.

Поскольку в выражении (1) при заданных условиях эксперимента все слагаемые, кроме  $G(t)$  и  $J(t)$ , являются константами, то это выражение может быть упрощено:

$$A(t) = A_0 \cdot (G(t) \cdot k_g + J(t) \cdot k_j + const). \quad (2)$$

Перепишем выражение (2) в следующем виде:

$$G(t) \cdot k_g + J(t) \cdot k_j = \frac{A(t)}{A_0} - const. \quad (3)$$

Поскольку время приготовления жидкостекольной стержневой смеси существенно меньше времени ее живучести, то на стадии приготовления стержневой смеси можно принять равным нулю слагаемое  $J(t) \cdot k_j$  в выражении (3) и, таким образом, по отношению  $\frac{A(t)}{A_0}$  можно определять степень готовности  $G(t)$  стержневой смеси.

После того как стержневая смесь будет приготовлена, слагаемое  $G(t) \cdot k_g$  в выражении (3) можно считать константой. Теперь по отношению  $\frac{A(t)}{A_0}$  можно определить живучесть  $J(t)$  стержневой смеси, связь которой с отношением  $\frac{A(t)}{A_0}$  определялась экспериментально путем испытаний специальных образцов, изготовленных из жидкостекольной стержневой смеси, на прочность при растяжении в течение 90 мин после их изготовления с шагом 10 мин по времени изготовления.

Внешний вид разработанной авторами компьютеризированной установки для испытаний образцов из жидкостекольной стержневой смеси на прочность при растяжении, сжатии и изгибе, а

также внешний вид стержневого ящика, изготовленного из полиэтилена, с образцами из жидкостекольной стержневой смеси показаны на рис. 1.



Рис. 1. Компьютеризированная установка для испытаний образцов из стержневой смеси на прочность и стержневой ящик с образцами  
Fig. 1. The computerized strength testing machine for the core mixture samples and the core box with the samples

Использовалась стержневая смесь, основными компонентами рецептуры которой были: кварцевый песок со средним размером песчинок 550 мкм в количестве 70–90%, натриевое жидкое стекло с плотностью 1,47 г/см<sup>3</sup> в количестве 6–15%, портландцемент марки М-400 в количестве 4–5% от массы стержневой смеси. В качестве добавок были использованы порошок каменного угля, древесного угля либо древесные опилки в количестве 1–2%, а также стальной порошок со средним размером частиц 65 мкм в количестве 5–10%. Результаты испытаний жидкостекольных образцов на прочность усреднялись по десяти стержням, которые были изготовлены одновременно и выдержаны в течение 30 мин в среде углекислого газа при избыточном давлении 2 атм и среднем расходе газа 5 л/мин, а также в последствии подвергнутые сушке при температуре 130–150°C в воздушной среде в течение 60 мин. По результатам проведенных испытаний образцов на прочность при растяжении определялось время, прошедшее от момента приготовления жидкостекольной стержневой смеси до момента, когда заметно снижалась прочность образцов, изготовленных из такой смеси. При уменьшении прочности при растяжении образцов литейных стержней более чем на 20% с высокой вероятностью возникали нарушения их

целостности при извлечении из стержневых ящиков. Время готовности стержневой смеси определялось путем последовательного измерения ее плотности, для чего взвешивались пробы стержневой смеси одинакового объема. Стержневая смесь считалась готовой, когда ее плотность достигала минимального значения для исследуемой рецептуры.

Экспериментальные исследования, проведенные авторами, показали, что для акустического контроля выше рассмотренных параметров жидкостекольной стержневой смеси могут быть использованы акустические волны как ультразвукового, так и звукового диапазона. Ультразвук имеет высокое поглощение в воздушной среде. Применяемые для его излучения и приема пьезоэлектрические преобразователи имеют узкую диаграмму направленности.

Для осуществления акустического контроля технологических параметров стержневой смеси также может быть использовано излучение ультразвуковых волн в виде модулированных посылок непосредственно в стержневую смесь. Для этого был использован стальной стержень длиной 50 мм, к одному торцу которого был приклейен пьезоэлектрический преобразователь, излучающий и принимающий ультразвуковые колебания. Необходимость такого стального стержня и его длина определяются глубиной мертвой зоны, в которой контроль отраженного сигнала невозможен из-за достаточно длительного времени излучения акустической посылки пьезоэлектрическим преобразователем. С противоположной стороны пьезоэлектрического преобразователя приклеен демпфирующий материал для предотвращения условий для возникновения затухающих колебаний пьезоэлектрического преобразователя. Таким образом реализуется эхо-импульсный метод ультразвукового контроля. По амплитуде отраженного ультразвукового сигнала от противоположного торца стального стержня можно контролировать технологические параметры стержневой смеси, так как на амплитуду отраженного сигнала влияют акустические свойства контактирующей с противоположным торцом стального стержня жидкостекольной стержневой смеси. Так, увеличение плотности жидкостекольной стержневой смеси и ее демпфирующей способности будет приводить к уменьшению амплитуды отраженного от границы раздела сред акустического сигнала в результате того, что часть акустического сигнала будет распространяться в жидкостекольную стержневую жидкость.

Внешний вид разработанного и использованного авторами в экспериментах ультразвукового прибора – приставки к планшетному компьютеру – показан на **рис. 2**. Ультразвуковой прибор состоит из следующих функциональных блоков: пьезоэлектрический преобразователь, генератор с ударным возбуждением, синхронизатор, амплитудный ограничитель с автоматической регулировкой усиления по времени распространения акустического сигнала, предварительный усилитель радиочастоты, основной усилитель радиочастоты, блок автоматической регулировки усиления, амплитудный детектор, усилитель импульсов, микроконтроллер, планшетный компьютер.

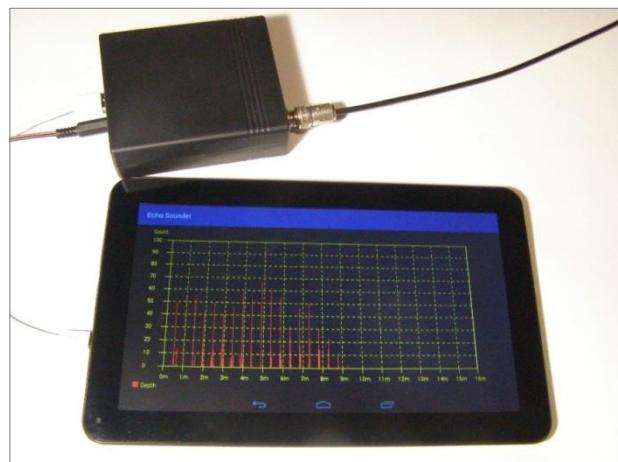


Рис. 2. Внешний вид ультразвукового прибора – приставки к планшетному компьютеру

Fig. 2. The appearance of the ultrasonic device in the form of the tablet accessory

При использовании акустических волн звукового диапазона необходимо осуществить выбор частоты зондирующего акустического сигнала после анализа спектра акустической эмиссии технологического оборудования стержневого участка. Так, на основании проведенных измерений было установлено, что основная мощность шума оборудования стержневого участка приходится на низкие частоты, не доходящие до 8 кГц. Таким образом, во избежание влияния акустических помех на работу измерительного оборудования рабочая частота должна быть выбрана выше 8 кГц.

При проведении экспериментов, направленных на проверку зависимости между амплитудой акустической волны, отраженной от поверхностного слоя жидкостекольной стержневой смеси, и другими параметрами жидкостекольной стержневой смеси в качестве излучателя и приемника акустического сигнала были выбраны

пьезоэлектрические излучатели торговой марки Yzsound, изготовленные в Китае, а также генератор звуковой частоты и полосовой усилитель, выполненные на базе высокостабильного операционного усилителя LM358 с рабочей полосой частот до 100 кГц. Для ввода данных в ЭВМ использовалась интегрированная звуковая карта с частотой дискретизации входного аналогового сигнала 192 кГц. Отношение амплитуд акустических волн, излучаемых пьезоэлектрическим излучателем и отраженных от поверхности жидкостекольной стержневой смеси, по соответствующим им оцифрованным электрическим сигналам контролировалось с использованием цифрового аудиоредактора Sound Forge Pro 11.0. Во избежание эффекта образования пучностей и узлов при образовании стоячих волн использовалась амплитудная модуляция излучаемого акустического сигнала сигналом прямоугольной формы со скважностью 1:10 и уровнем модуляции 100%. Для снижения акустической наводки непосредственно от излучающего на приемный пьезоэлектрический преобразователь использовался звукопоглощающий экран, изготовленный из фильтра механической очистки воды со степенью фильтрации 10 мкм, обладающий хорошим звукопоглощением в рабочем диапазоне частот. Результаты измерений отношения амплитуд акустических волн, излучаемых пьезоэлектрическим излучателем и отраженных от поверхности жидкостекольной стержневой смеси, усреднялись. Количество повторных измерений, подлежащих усреднению, рассчитывалось исходя из 99-процентной достоверности ожидаемых результатов акустического контроля жидкостекольной стержневой смеси с использованием критерия Фишера.

### **Заключение**

В результате проведенных исследований было установлено, что в течение времени приготовления стержневой смеси (до ее готовности) амплитуда акустического сигнала, отраженного от поверхностного слоя стержневой смеси, уменьшается в среднем на 15%, а при достижении предельного уровня живучести стержневой смеси амплитуда отраженного акустического сигнала увеличивается в среднем на 7%. Добавление в стержневую смесь каменного угля, древесного угля либо древесных опилок в количестве 1–2% приводит к уменьшению амплитуды отраженного акустического сигнала на 4–6%, а добавление в стержневую смесь стального по-

рошка в количестве 5–10% приводит к уменьшению амплитуды отраженного акустического сигнала на 18–25%, что объясняется большим рассеиванием и поглощением акустических колебаний на стальных частицах.

Таким образом, предложенный способ акустического контроля технологических параметров жидкостекольной стержневой смеси, основанный на полученной зависимости между амплитудой акустической волны, отраженной от поверхностного слоя жидкостекольной стержневой смеси, и другими параметрами стержневой смеси, вполне применим в условиях стержневого участка литейного производства, так как имеет достаточную точность для контроля степени готовности и живучести стержневой смеси. Возможность использования контактного и бесконтактного введения акустических волн в стержневую смесь при использовании ультразвуковых или звуковых колебаний расширяет возможности практического применения предложенного способа контроля. Точность акустического контроля при контактном введении ультразвуковых колебаний в жидкостекольную стержневую смесь по сравнению с бесконтактным контролем через воздушную среду в условиях стержневого производства может оказаться заметно меньшей из-за налипания стержневой смеси на стальной стержень излучателя ультразвуковых волн при длительной эксплуатации оборудования.

На точность результатов осуществления акустического зондирования поверхности жидкостекольной стержневой смеси через воздушную среду может оказывать заметное влияние изменение однородности поверхности стержневой смеси. Поэтому комбинирование обоих вариантов осуществления акустического контроля параметров жидкостекольной стержневой смеси с необходимыми мероприятиями по обслуживанию излучателей акустических колебаний в процессе их длительной эксплуатации позволит получить требуемую точность результатов акустического контроля в условиях стержневого участка литейного цеха. Применение на технологическом оборудовании для приготовления жидкостекольной стержневой смеси требующего обслуживания электронного измерительного устройства целесообразно с точки зрения необходимости повышения производительности стержневого процесса и качества жидкостекольных литейных стержней. Работа лопастных смесителей создает периодические возмущающие воздействия на измерительную систему, прояв-

ляющиеся в изменении условий отражения, рассеивания и поглощения акустических сигналов при прохождении лопастей в зоне чувствительности датчиков. Такие возмущения имеют строгую периодичность, что позволяет уменьшить их влияние на точность измерений.

### **Список литературы**

1. Yurchenko S. V. Modern formula of quality. Foundry production and metallurgy // *Litiyo i Metallurgiya* [Foundry production and metallurgy]. № 3. С. 89–92.
2. Di Sabatino Marisa. Fluidity of Aluminium Foundry Alloys. Doctoral thesis, comprehensive summary. Norwegian University of Science and Technology, Department of Materials Technology, 2005. 161 c.
3. Mikell P. Groover. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. 7<sup>th</sup> Ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2020. 816 c.
4. Holtzer M., Kmita A. Mold and Core Sands in Metalcasting: Chemistry and Ecology Sustainable Development. New York City, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2020. 378 c.
5. Xie Yiran. Recycling of foundry waste materials. Electronic ThesisDiss., University of Birmingham, 2016. 306 c.
6. Belash V. V., Akhmetov T. A., Oborov M. V. The ways to ensure fatigue strength of cold-formed rebars. Foundry production and metallurgy // *Litiyo i Metallurgiya* [Foundry production and metallurgy]. № 3. С. 102–106.
7. Jain P. L. Principles of Foundry Technology. 5<sup>th</sup> Ed. New York City: Tata McGraw Hill Publishing, 2014. 479 c.
8. Srinivasan M. Science and Technology of Casting Processes. London: IntechOpen Limited, 2012. 350 c.
9. Wang W., Conley H. W., Stoll J. G. Rapid Tooling Guidelines for Sand Casting. New York City, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2010. 164 c.
10. Brown J. R. Foseco Ferrous Foundryman's Handbook. 11<sup>th</sup> Ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2000. 384 c.

### **References**

1. Yurchenko S.V. Modern formula of quality. *Litiyo i metallurgiya* [Foundry production and metallurgy], 2019, no. 3, pp. 89–92. (In Russ.)
2. Di Sabatino Marisa. Fluidity of aluminium foundry alloys. Doctoral thesis, comprehensive summary. Norwegian University of Science and Technology, Department of Materials Technology, 2005, 161 p.
3. Mikell P. Groover. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems. 7<sup>th</sup> Ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2020, 816 p.
4. Holtzer M., Kmita A. Mold and core sands in metalcasting: chemistry and ecology sustainable development. New York City, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2020, 378 p.
5. Xie Yiran. Recycling of foundry waste materials. Electronic thesis, the University of Birmingham, 2016, 306 p.
6. Belash V.V., Akhmetov T.A., Oborov M.V. The ways to ensure fatigue strength of cold-formed rebars. *Litiyo i metallurgiya* [Foundry production and metallurgy], 2019, no. 3, pp. 102–106. (In Russ.)
7. Jain P.L. Principles of foundry technology. 5<sup>th</sup> Ed. New York City: Tata McGraw Hill Publishing, 2014, 479 p.
8. Srinivasan M. Science and technology of casting processes. London: IntechOpen Limited, 2012, 350 p.
9. Wang W., Conley H.W., Stoll J.G. Rapid tooling guidelines for sand casting. New York City, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2010, 164 p.
10. Brown J.R. Foseco Ferrous Foundryman's Handbook. 11th Ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2000, 384 p.

Поступила 18.07.2021; принята к публикации 02.08.2021; опубликована 24.12.2021  
Submitted 18/07/2021; revised 02/08/2021; published 24/12/2021

**Гутко Юрий Иванович** – доктор технических наук, профессор, первый проректор, Луганский государственный университет имени В. Даля, Луганск.  
Email: lguni.lit@yandex.ru

**Войтенко Валерий Владимирович** – аспирант кафедры промышленного и художественного литья, Луганский государственный университет имени В. Даля, Луганск.  
Email: valery.voytenko@outlook.com

**Yury I. Gutko** – DrSc (Eng.), Professor, First Vice-Rector, Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk.  
Email: lguni.lit@yandex.ru

**Valery V. Voytenko** – postgraduate student of the Industrial and Art Castings Department, Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk.  
Email: valery.voytenko@outlook.com