

Гутько Ю.И., Войтенко В.В. Влияние рецептуры и технологии изготовления жидкостекольных литейных стержней на их эксплуатационные характеристики // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 84–90. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.3.10

Gutko Y.I., Voytenko V.V. Influence of core-mixture composition and core-making technology on operational properties of foundry liquid-glass cores. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 84–90. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.3.10

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**

**Т. 23, № 3, 2021**

**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**

<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.3.10

УДК 621.743.42

**Ю.И. Гутько, В.В. Войтенко**

Луганский государственный университет им. В. Даля, Луганск

**ВЛИЯНИЕ РЕЦЕПТУРЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕКольНЫХ  
ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Исследования направлены на поиск методики расчета состава жидкостекольной стержневой смеси, имеющей наилучшее сочетание между выбиваемостью жидкостекольных литейных стержней из отливок и их манипуляторной прочностью. Для этого исследовано влияние рецептуры жидкостекольной стержневой смеси – процентного содержания в стержневой смеси жидкого стекла, металлургического шлака, углерода в виде каменного угля, древесного угля или древесных опилок – на указанные технологические свойства литейных стержней. Показано, что увеличение процентного содержания жидкого стекла в стержневой смеси будет повышать манипуляторную и максимальную прочность литейных стержней, а вводимый в стержневую смесь углерод будет выгорать при высоких температурах литейных стержней, увеличивая их пористость и улучшая выбиваемость из отливок. Исследовано влияние нанесенных на литейный стержень покрытий на основе жидкого стекла на его технологические свойства. По результатам проведенных исследований получена методика расчета состава стержневой смеси и выбора параметров технологического процесса по заданной величине выбиваемости литейного стержня из отливки и величине его манипуляторной прочности с учетом используемого наполнителя – чистого кварцевого песка либо кварцевого песка с добавлением оборотной смеси. Обсуждаются результаты экспериментальных исследований манипуляторной и максимальной прочности при растяжении, сжатии и изгибе, а также выбиваемости жидкостекольных литейных стержней из отливок, изготовленных по различным рецептурам и технологиям. По результатам сравнительного анализа установлены особенности и границы применения песчаных литейных стержней с различным процентным содержанием жидкого стекла, используемого в качестве связующего вещества, и других компонентов жидкостекольной стержневой смеси. Сформулированы некоторые общие рекомендации по применению жидкостекольных стержневых смесей различной рецептуры, а также по применению покрытий на основе жидкого стекла для поверхностей литейных стержней с целью повышения их максимальной прочности в сочетании с хорошей выбиваемостью из отливок.

**Ключевые слова:** жидкое стекло, кварцевый песок, жидкостекольная стержневая смесь, оборотная смесь, стержневой ящик, литейный стержень, рецептура, технология, испытание на прочность, манипуляторная прочность, максимальная прочность, выбиваемость из отливок, эксперимент, сравнительный анализ, методика расчета.

**Yu.I. Gutko, V.V. Voytenko**

Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk

**INFLUENCE OF CORE-MIXTURE COMPOSITION AND CORE-MAKING TECHNOLOGY  
ON OPERATIONAL PROPERTIES OF FOUNDRY LIQUID-GLASS CORES**

The research purpose is to obtain the calculation method for the core-mixture composition, which has the optimal combination of the destructibility and the operational structural robustness of the foundry liquid-glass cores. The influence of the core-mixture composition – the percentage of liquid glass, metallurgical slag, and carbon (in the form of coal, charcoal, or sawdust) in the core mixture – on the specified technological properties of the cores is investigated. It is shown that the increase in the percentage of liquid glass in the core mixture will increase the operational and ultimate structural robustness of the cores, as well as carbon (added to the core mixture) will burn out at high temperatures, increasing the porosity and the destructibility of the cores. The influence of the liquid-glass coatings on the technological properties of the cores is investigated. The calculation method for the core-mixture composition and the selection method for the parameters of the core-making process depending on the given values of the destructibility and the operational structural robustness of the cores, as well as the used filler (pure quartz sand or quartz sand with the addition of the circulating mixture) are obtained. The results of the experimental research of the operational and ultimate structural robustness during stretching, compressing, and bending, as well as the destructibility of the liquid-glass cores of the various compositions are discussed. The specialties and the boundaries of using the sand cores with the various percentages of liquid glass used as a binder and other components of the core mixture are established. Some general recommendations for using the liquid-glass core mixtures of the various compositions and the liquid-glass surface coatings of the cores to increase their ultimate structural robustness in combination with the good destructibility are formulated.

**Keywords:** liquid glass, quartz sand, liquid-glass core mixture, circulating mixture, core box, foundry core, composition, technology, materials testing, operational structural robustness, ultimate structural robustness, destructibility, experiment, comparative analysis, calculation method.

Дальнейшие перспективы применения жидкого стекла в качестве связующего вещества при производстве песчаных литейных стержней связаны с повышением производительности, экономией связующего вещества, применением оборотной смеси, увеличением манипуляторной и максимальной прочности в сочетании с улучшением выбиваемости жидкостекольных литейных стержней из отливок [1–6]. Существуют различные рекомендуемые рецептуры жидкостекольных литейных стержней в зависимости от назначения литейного стержня, его объема и класса сложности [7–12]. Существуют также различные рекомендации и мнения насчет процентной доли оборотной смеси в составе стержневой смеси и оправданности ее применения с точки зрения качества и эксплуатационных свойств литейных стержней, а также экономики [13–18]. Отсутствие однозначного мнения на этот счет, а также существующая необходимость в улучшении эксплуатационных характеристик литейных стержней и жидкостекольной стержневой технологии делает весьма актуальным проведение исследований в этом направлении [19–25].

Методика исследований заключалась в следующем. Использовались стержневые ящики из полиэтилена, которые после заполнения стержневой смесью под избыточным давлением 2 атм выдерживались в газовой камере в течение 40 мин в среде углекислого газа при расходе газа 5 л/мин. После извлечения из газовой камеры стержневые ящики выдерживались при температуре 50 °С в течение 12 ч, после чего литейные стержни извлекались из стержневых ящиков.

Для изготовления стержневых смесей различной рецептуры использовалось натриевое жидкое стекло с плотностью 1,44 кг/л, а также кварцевый песок в качестве наполнителя в чистом виде либо с добавкой оборотной смеси с таким же исходным составом, полученным путем измельчения выбитых из отливок литейных стержней. В качестве добавок использовался феррохромовый шлак (состав: CaO – 48,0...54,0 %; SiO<sub>2</sub> – 20,0...30,0 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 4,0...8,0 %; MgO – 7,0...12,0 %; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 2,0...12,0 %; FeO – 0,1...2,0 %), портландцемент марки М-400, каменный уголь, древесный уголь и древесные опилки.

После выемки из стержневых ящиков жидкостекольные литейные стержни одинакового состава делились на три равные части. Первые части снаружи покрывались при помощи мягкой кисти покрытием, состоящим из жидкого стекла либо смеси жидкого стекла и портландцемента марки М-400, а затем сушились в течение 40 мин при температуре 140–160 °С в воздушной среде и по-

сле остывания испытывались на прочность при растяжении, сжатии и изгибе. Аналогичные измерения выполнялись для вторых частей жидкостекольных литейных стержней аналогичного состава. Третья часть жидкостекольных литейных стержней испытывалась на прочность сразу же после выемки из стержневого ящика. Таким образом определялась манипуляторная прочность литейных стержней. Аналогично выполнялись измерения для литейных стержней с другим составом. Данные по одинаковым литейным стержням усреднялись и сравнивались с данными для литейных стержней различного состава с внешним покрытием и без покрытия. Выбиваемость образцов литейных стержней различной рецептуры с дополнительным покрытием либо без покрытия проверялась с использованием десятибалльной шкалы выбиваемости, в которой одному баллу соответствует отличная выбиваемость, а десяти баллам – очень плохая выбиваемость литейного стержня из отливки.

По результатам сравнительного анализа экспериментальных данных было установлено следующее. Увеличение процентного содержания жидкого стекла в стержневой смеси увеличивает манипуляторную и максимальную прочность литейного стержня, при этом ухудшая его выбиваемость из отливки. Добавление оборотной смеси в стержневую смесь увеличивает прочность литейного стержня при растяжении, сжатии и изгибе, но при этом увеличивает величину усадки стержневой смеси в стержневом ящике, приводящую к росту внутренних напряжений в литейном стержне, способных привести к образованию трещин на протяженных его участках. Таким образом, следует ограничивать содержание оборотной смеси в стержневой смеси до 50–60 % от процентного содержания кварцевого песка. При 100%-ном содержании оборотной смеси наблюдается до 90–100 % брака длинных литейных стержней, содержащих дефекты в виде трещин, и при этом такие литейные стержни имеют затруднительную выбиваемость.

Увеличение процентной доли в стержневой смеси такой добавки, как феррохромовый шлак, который может быть заменен на портландцемент марки М-400, приводит сначала к увеличению манипуляторной и максимальной прочности, а затем при большем процентном содержании в стержневой смеси – к уменьшению прочности литейного стержня. Оптимальное количество таких добавок приблизительно соответствует половине от процентного содержания жидкого стекла в стержневой смеси. При использовании в стержневой смеси оборотной смеси в количестве до вышеуказанного

процентного содержания с увеличением процентной доли оборотной смеси процентное содержание в смеси шлака либо цемента может быть уменьшено на величину, ориентировочно равную одной десятой от процентного содержания оборотной смеси в стержневой смеси.

Количество жидкого стекла в стержневой смеси определялось из условия достижения компромисса между необходимой манипуляторной прочностью и хорошей выбиваемостью литейных стержней из отливок. Применение покрытия из чистого жидкого стекла либо жидкого стекла, смешанного с портландцементом марки М-400, показало, что получить хорошую выбиваемость литейных стержней можно при использовании стержневых смесей с 12–17 % жидкого стекла и 10 % цемента благодаря наружной обработке таких литейных стержней указанным составом после их извлечения из стержневых ящиков с последующей их сушкой в течение 40–60 мин при температуре 120–160 °С. Применение в этом случае покрытия позволяет повысить максимальную прочность литейных стержней и при этом немного – не более чем на 1 балл – снизить их выбиваемость из отливок.

Для получения отличной выбиваемости и достаточной манипуляторной прочности литейных стержней количество жидкого стекла в стержневой смеси может быть увеличено до 17–22 %; при этом в стержневую смесь может быть добавлен цемент в количестве около 10 %, а также углерод в виде каменного угля, древесного угля либо древесных опилок в количестве 0,5–2,0 %. Повышенное количество жидкого стекла в стержневой смеси будет повышать манипуляторную и максимальную прочность литейных стержней, а вводимый в стержневую смесь углерод будет выгорать при высоких температурах литейного стержня, находящегося в отливке, в результате чего пористость литейного стержня будет увеличиваться и он будет легко выбиваться.

Проведенные эксперименты показали, что литейные стержни с добавлением древесного угля или древесных опилок не подходят для последующего их покрытия после извлечения из стержневых ящиков жидким стеклом либо составом на его основе, так как из-за повышенной пористости жидкое стекло проникает на достаточно большую глубину, ухудшая выбиваемость таких литейных стержней из отливок. Данная проблема частично решается повышением плотности состава на основе жидкого стекла путем введения большого количества цемента.

По результатам исследований получена следующая методика расчета состава стержневой сме-

си и выбора параметров технологического процесса. Задаем в качестве исходных данных требуемую выбиваемость литейного стержня из отливок. Далее по величине заданной прочности выполняем расчет состава стержневой смеси. Если используется чистый кварцевый песок либо кварцевый песок с добавлением оборотной смеси, то процентное содержание  $I$  жидкого стекла в стержневой смеси рассчитываем по следующей формуле:

$$I = 60\sigma, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – заданная прочность, МПа;  $I$  – содержание жидкого стекла в стержневой смеси, %.

Если в состав стержневой смеси добавляется оборотная смесь, то рассчитаем ее процентное содержание  $I_0$  в стержневой смеси, используя следующую формулу:

$$I_0 = 10^3\sigma - 250, \quad (2)$$

где  $I_0$  – доля оборотной смеси от доли кварцевого песка в стержневой смеси, %.

Рассчитаем процентное содержание  $I_1$  шлака или цемента в стержневой смеси:

$$I_1 = \frac{I}{2}. \quad (3)$$

Рассчитаем процентное содержание  $I_2$  каменного угля, древесного угля или древесных опилок:

$$I_2 = -20\sigma + 7. \quad (4)$$

Теперь, когда состав стержневой смеси определен, выполним расчет параметров технологического процесса изготовления жидкостекольных литейных стержней. По массе литейных стержней рассчитаем требуемый объем  $V$  углекислого газа:

$$V = \frac{mI}{0,2p}, \quad (5)$$

где  $V$  – требуемый объем углекислого газа, л;  $m$  – масса литейных стержней, кг;  $p$  – давление углекислого газа, атм.

Рассчитаем время  $t_1$  выдержки литейных стержней в атмосфере углекислого газа:

$$t_1 = -0,4T_1 + 68, \quad (6)$$

где  $t_1$  – время выдержки литейных стержней в среде  $\text{CO}_2$ , мин;  $T_1$  – температура  $\text{CO}_2$ , °С.

Рассчитаем время  $t_2$  сушки литейных стержней в воздушной среде:

$$t_2 = -0,0625T_2 + 13,2, \quad (7)$$

где  $t_2$  – время сушки литейных стержней, ч;  $T_2$  – температура сушки, °С.

В случае использования покрытия литейных стержней с составом на основе жидкого стекла после их извлечения из стержневых ящиков для увеличения их максимальной прочности рассчитанное по формуле (7) время сушки увеличивается на 20 %. Следует отметить, что точность расчетов согласно предложенной авторами методики (формулы (1)–(7)) во многом зависит от плотности жидкого стекла, его силикатного модуля, свойств материала стержневого ящика (адгезии, гигроскопичности и газопроницаемости), а также от качества используемого кварцевого песка и степени отжига оборотной смеси.

В качестве примера (рис. 1 и 2) приведены результаты испытаний на прочность при растяжении образцов литейных стержней с применением дополнительного покрытия на основе жидкого стекла и без него ( $\sigma$  – механическое напряжение, МПа;  $L$  – абсолютное удлинение, мм).

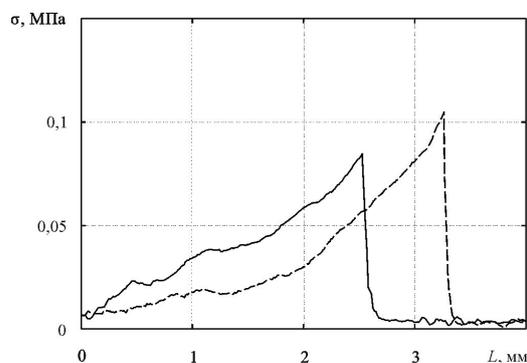


Рис. 1. Результаты испытаний на прочность при растяжении образцов литейных стержней без добавления древесного угля: — — — с применением дополнительного покрытия; — — — без дополнительного покрытия

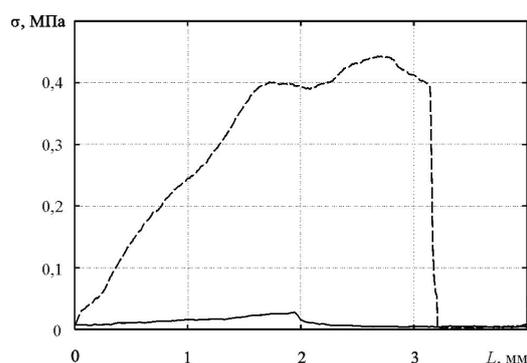


Рис. 2. Результаты испытаний на прочность при растяжении образцов литейных стержней с содержанием древесного угля в стержневой смеси в количестве 2 %: — — — с применением дополнительного покрытия; — — — без дополнительного покрытия

Прочность литейных стержней, покрытых снаружи смесью жидкого стекла, выше, чем прочность литейных стержней без дополнительного по-

крытия. Для литейного стержня с дополнительным покрытием, содержащим 2 % древесного угля, прочность намного выше, чем у такого же литейного стержня без покрытия, однако выбиваемость литейного стержня с покрытием намного хуже – 3–4 балла по введенной десятибалльной шкале выбиваемости (1 балл – наилучшая выбиваемость, а 10 баллов – наихудшая выбиваемость), в то время как у такого же литейного стержня без покрытия выбиваемость составляет 1 балл. Так, например, литейный стержень, содержащий 80 % оборотной смеси, 15 % жидкого стекла и 5 % портландцемента марки М-400, имеет выбиваемость 3–4 балла, а такой же литейный стержень на основе чистого кварцевого песка имеет выбиваемость 1–2 балла. Литейный стержень, содержащий 20 % жидкого стекла, 10 % портландцемента марки М-400, 2 % древесного угля, 68 % кварцевого песка, имеет выбиваемость 1 балл. Таким образом, используя предложенную методику расчета состава стержневой смеси и параметров технологического процесса, можно получить необходимые свойства литейного стержня.

## Выводы

1. Проведенные экспериментальные исследования и выполненный сравнительный анализ полученных данных позволили получить методику расчета состава стержневых смесей и параметров технологического процесса для жидкостекольной стержневой технологии в соответствии с заданной манипуляторной либо максимальной прочностью литейных стержней.

2. Предложенный способ покрытия составом на основе жидкого стекла литейных стержней после их извлечения из стержневых ящиков позволяет повысить их максимальную прочность и при этом заметно не ухудшить их выбиваемость из отливок.

3. Использование стержневых смесей с повышенным содержанием жидкого стекла (17–22 %) приводит к ухудшению выбиваемости литейных стержней из отливок из-за более высокой термостойкости и худшего отжига.

4. Добавление в стержневую смесь 0,5–2,0 % углерода в виде каменного угля, древесного угля либо древесных опилок улучшает выбиваемость литейных стержней из отливок за счет меньшей их термостойкости и меньшего выгорания углерода.

5. Дополнительное покрытие литейных стержней составом на основе жидкого стекла и цемента после выемки из стержневых ящиков увеличивает их максимальную прочность после сушки. Однако при этом следует учитывать, что более пористые стержневые смеси, например с добавлени-

ем древесного угля или древесных опилок, способны впитывать большое количество покрывающего состава, в результате чего повышается прочность и существенно ухудшается выбиваемость литейных стержней из отливок.

6. Для стержневых смесей с процентным содержанием жидкого стекла в количестве до 12–17 % увеличить максимальную прочность литейных стержней можно путем их покрытия, после извлечения из стержневых ящиков, составом из жидкого стекла с содержанием 10–20 % цемента. Однако для стержневых смесей с добавлением древесного угля в количестве до 2 %, цемента до 10 % и долей жидкого стекла до 17–22 % дополнительное покрытие не требуется. Литейные стержни такого состава имеют отличную выбиваемость, однако не очень высокую манипуляторную прочность, хотя достаточную для их использования с минимальным браком (5–10 %).

### Список литературы

- 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. – URL: <https://www.amazon.com/Mold-Core-Sands-Metalcasting-Sustainable/dp/3030532097> (accessed 28 June 2021).
- Rao P.N. Manufacturing technology: [in 2 books]. Vol. 1. Foundry, Forming and Welding. – New Delhi: McGraw Hill (India) Private Limited, 2018. – 584 p. – URL: <https://www.amazon.in/Manufacturing-Technology-Vol-P-N-Rao/dp/1259029565> (accessed 28 June 2021).
- Haidemenopoulos G.N. Physical metallurgy: principles and design. – Boca Raton, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018. – 490 p. DOI: 10.1201/9781315211220
- Global Casting Magazine. – Palo Alto; Copenhagen; Berlin; New York City; Schaumburg; Füssen; Beijing: Issuu, Modern Casting, Foundry-Planet.com, The China Foundry Association, 2018. – No. 1. – 75 p. – URL: <https://www.twirpx.com/file/2998575> (accessed 28 June 2021).
- Global Casting Magazine. – Palo Alto; Copenhagen; Berlin; New York City; Schaumburg; Füssen; Beijing: Issuu, Modern Casting, Foundry-Planet.com, The China Foundry Association, 2018. – No. 2. – 46 p. – URL: <https://www.twirpx.com/file/2998581> (accessed 28 June 2021).
- Global Casting Magazine. – Palo Alto; Copenhagen; Berlin; New York City; Schaumburg; Füssen; Beijing: Issuu, Modern Casting, Foundry-Planet.com, The China Foundry Association, 2018. – No. 3. – 52 p. – URL: <https://www.twirpx.com/file/2998586> (accessed 23 June 2021).
- Global Casting Magazine. – Palo Alto; Copenhagen; Berlin; New York City; Schaumburg; Füssen; Beijing: Issuu, Modern Casting, Foundry-Planet.com, The China Foundry Association, 2018. – No. 4. – 60 p. – URL: <https://www.twirpx.com/file/2998590> (accessed 15 June 2021).
- Budynas R., Nisbett K. Shigley's mechanical engineering design. – 11th ed. – New York City: Tata McGraw Hill Publishing Co. Ltd., 2019. – 1120 p. – URL: <https://www.amazon.com/Shigleys-Mechanical-Engineering-Richard-Budynas/dp/0073398217> (accessed 28 June 2021).
- Holtzer M., Górný M., Danko R. Microstructure and properties of ductile iron and compacted graphite iron castings: the effects of mold sand/metal interface phenomena. – Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2015. – 166 p. – (Springer Briefs in Materials). – URL: <https://www.amazon.com/Microstructure-Properties-Compacted-Graphite-Castings/dp/3319145827> (accessed 15 June 2021).
- Jain P.L. Principles of foundry technology. – 5th ed. – New York City: Tata McGraw Hill Publishing Co. Ltd., 2014. – 479 p. – URL: <https://www.amazon.in/Principles-Foundry-Technology-P-Jain/dp/0070151296> (accessed 28 June 2021).
- Berns H., Gavriljuk V., Riedner S. High interstitial stainless austenitic steels. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. – 167 p. DOI: 10.1007/978-3-642-33701-7
- Srinivasan M. Science and technology of casting processes. – London: IntechOpen Limited, 2012. – 350 p. DOI: 10.5772/3128
- Mahi S., Thomas S.P. Technology for magnesium castings: design, products & applications. – Schaumburg: American Foundry Society, 2011. – 314 p. – URL: <https://www.amazon.com/Technology-Magnesium-Castings-Products-Applications/dp/0874333741> (accessed 23 June 2021).
- Gingery D.J. Build your own metal working shop from scrap: [in 7 books]. Vol. 2. The metal lathe. – USA: David J. Gingery Publishing, LLC, 2011. – 128 p. – URL: <https://www.amazon.com/Build-Metal-Working-Scrap-Complete/dp/1878087355> (accessed 28 June 2021).
- Wang W., Conley H.W., Stoll J.G. Rapid tooling guidelines for sand casting. – New York City; Dordrecht; Heidelberg; London: Springer, 2010. – 164 p. – URL: <https://www.amazon.com/Tooling-Guidelines-Casting-Mechanical-Engineering/dp/1441957308> (accessed 15 June 2021).
- Neff D. Casting defects handbook: copper & copper-base alloys. – Schaumburg: American Foundry Society, 2010. – 88 p. – URL: <https://www.amazon.com/Casting-Defects-Handbook-Copper-Copper-Base/dp/0874333652> (accessed 15 June 2021).
- West T.D. Metallurgy of cast iron. – Ravensdale; Washington: Pine Woods Press, 2008. – 648 p. – URL: <https://www.amazon.com/Metallurgy-Cast-Iron-Thomas-West/dp/1443749877> (accessed 28 June 2021).
- Seetharaman S. Fundamentals of metallurgy. – Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2005. – 576 p. – URL: [https://www.academia.edu/19795256/Fundamentals\\_of\\_Metallurgy](https://www.academia.edu/19795256/Fundamentals_of_Metallurgy) (accessed 28 June 2021).
- Campbell J. Castings. – 2nd ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. – 352 p. – URL: <https://www.amazon.com/Castings-John-Campbell/dp/0750647906> (accessed 28 June 2021).
- Chastain S.D. Metal casting: a sand casting manual for the small foundry: [in 2 books]. – Jacksonville: Chastain Publishing, 2003. – Vol. 1. – 207 p. – URL: <https://www.amazon.com/Metal-Casting-Manual-Small-Foundry/dp/0970220324> (accessed 28 June 2021).
- Chastain S.D. Metal casting: a sand casting manual for the small foundry: [in 2 books]. – Jacksonville: Chastain Publishing, 2004. – Vol. 2. – 187 p. – URL: <https://www.amazon.com/Metal-Casting-Manual-Small-Foundry/dp/0970220332> (accessed 15 June 2021).

22. Hoffman H. Casting metal parts. – San Angelo: Action Book Publishers, 2002. – 86 p. – URL: <https://pdfslide.net/engineering/casting-metal-parts-by-harold-hoffman.html> (accessed 28 June 2021).

23. Beeley P.R. Foundry technology. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. – 720 p. – URL: [https://www.academia.edu/4161769/foundry\\_technology\\_by\\_peter\\_beeley](https://www.academia.edu/4161769/foundry_technology_by_peter_beeley) (accessed 28 June 2021).

24. Brown J.R. Foseco ferrous foundryman's handbook. – 11th ed. – Oxford: Butterworth Heinemann, 2000. – 384 p. – URL: <https://www.amazon.com/Foseco-Ferrous-Foundrymans-Handbook-Brown/dp/075064284X> (accessed 28 June 2021).

25. Hurst S. Metal casting: appropriate technology in the small foundry. – London: Intermediate Technology Publications, 1996. – 227 p. – URL: <https://www.amazon.com/Metal-Casting-Appropriate-Technology-Foundry/dp/1853391972> (accessed 28 June 2021).

### References

1. 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. URL: <https://www.amazon.com/Mold-Core-Sands-Metalcasting-Sustainable/dp/3030532097> (accessed 28 June 2021).

2. Rao P.N. Manufacturing technology: [in 2 books]. Vol. 1. Foundry, Forming and Welding. New Delhi: McGraw Hill (India) Private Limited, 2018, 584 p. URL: <https://www.amazon.in/Manufacturing-Technology-Vol-P-N-Rao/dp/1259029565> (accessed 28 June 2021).

3. Haidemenopoulos G.N. Physical metallurgy: principles and design. Boca Raton, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018, 490 p. DOI: 10.1201/9781315211220

4. Global Casting Magazine. Palo Alto; Copenhagen; Berlin; New York City; Schaumburg; Füssen; Beijing: Issuu, Modern Casting, Foundry-Planet.com, The China Foundry Association, 2018, no. 1., 75 p. URL: <https://www.twirpx.com/file/2998575> (accessed 28 June 2021).

5. Global Casting Magazine. Palo Alto; Copenhagen; Berlin; New York City; Schaumburg; Füssen; Beijing: Issuu, Modern Casting, Foundry-Planet.com, The China Foundry Association, 2018, no. 2, 46 p. URL: <https://www.twirpx.com/file/2998581> (accessed 28 June 2021).

6. Global Casting Magazine. Palo Alto; Copenhagen; Berlin; New York City; Schaumburg; Füssen; Beijing: Issuu, Modern Casting, Foundry-Planet.com, The China Foundry Associati, 2018, no. 3, 52 p. URL: <https://www.twirpx.com/file/2998586> (accessed 23 June 2021).

7. Global Casting Magazine. Palo Alto; Copenhagen; Berlin; New York City; Schaumburg; Füssen; Beijing: Issuu, Modern Casting, Foundry-Planet.com, The China Foundry Associatio, 2018, no. 4, 60 p. URL: <https://www.twirpx.com/file/2998590> (accessed 15 June 2021).

8. Budynas R., Nisbett K. Shigley's mechanical engineering design. 11th ed. New York City: Tata McGraw Hill Publishing Co. Ltd., 2019, 1120 p. URL: <https://www.amazon.com/Shigleys-Mechanical-Engineering-Richard-Budynas/dp/0073398217> (accessed 28 June 2021).

9. Holtzer M., Gómy M., Danko R. Microstructure and properties of ductile iron and compacted graphite iron castings: the effects of mold sand/metal interface phenomena. – Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2015, 166 p. (Springer Briefs in Materials). URL: <https://www.amazon.com/Microstructure-Properties-Compacted-Graphite-Castings/dp/3319145827> (accessed 15 June 2021).

10. Jain P.L. Principles of foundry technology. 5th ed. New York City: Tata McGraw Hill Publishing Co. Ltd., 2014, 479 p. URL: <https://www.amazon.in/Principles-Foundry-Technology-P-Jain/dp/0070151296> (accessed 28 June 2021).

11. Berns H., Gavriljuk V., Riedner S. High interstitial stainless austenitic steels. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, 167 p. DOI: 10.1007/978-3-642-33701-7

12. Srinivasan M. Science and technology of casting processes. London: IntechOpen Limited, 2012, 350 p. DOI: 10.5772/3128

13. Mahi S., Thomas S.P. Technology for magnesium castings: design, products & applications. Schaumburg: American Foundry Society, 2011, 314 p. URL: <https://www.amazon.com/Technology-Magnesium-Castings-Products-Applications/dp/0874333741> (accessed 23 June 2021).

14. Gingery D.J. Build your own metal working shop from scrap: [in 7 books]. Vol. 2. The metal lathe. USA: David J. Gingery Publishing, LLC, 2011, 128 p. URL: <https://www.amazon.com/Build-Metal-Working-Scrap-Complete/dp/1878087355> (accessed 28 June 2021).

15. Wang W., Conley H.W., Stoll J.G. Rapid tooling guidelines for sand casting. New York City; Dordrecht; Heidelberg; London: Springer, 2010, 164 p. URL: <https://www.amazon.com/Tooling-Guidelines-Casting-Mechanical-Engineering/dp/1441957308> (accessed 15 June 2021).

16. Neff D. Casting defects handbook: copper & copper-base alloys. Schaumburg: American Foundry Society, 2010, 88 p. URL: <https://www.amazon.com/Casting-Defects-Handbook-Copper-Copper-Base/dp/0874333652> (accessed 15 June 2021).

17. West T.D. Metallurgy of cast iron. Ravensdale; Washington: Pine Woods Press, 2008, 648 p. URL: <https://www.amazon.com/Metallurgy-Cast-Iron-Thomas-West/dp/1443749877> (accessed 28 June 2021).

18. Seetharaman S. Fundamentals of metallurgy. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2005, 576 p. URL: [https://www.academia.edu/19795256/Fundamentals\\_of\\_Metallurgy](https://www.academia.edu/19795256/Fundamentals_of_Metallurgy) (accessed 28 June 2021).

19. Campbell J. Castings. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003, 352 p. URL: <https://www.amazon.com/Castings-John-Campbell/dp/0750647906> (accessed 28 June 2021).

20. Chastain S.D. Metal casting: a sand casting manual for the small foundry: [in 2 books]. Jacksonville: Chastain Publishing, 2003, vol. 1, 207 p. URL: <https://www.amazon.com/Metal-Casting-Manual-Small-Foundry/dp/0970220324> (accessed 28 June 2021).

21. Chastain S.D. Metal casting: a sand casting manual for the small foundry: [in 2 books]. Jacksonville: Chastain Publishing, 2004, vol. 2, 187 p. URL: <https://www.amazon.com/Metal-Casting-Manual-Small-Foundry/dp/0970220332> (accessed 15 June 2021).

22. Hoffman H. Casting metal parts. San Angelo: Action Book Publishers, 2002, 86 p. URL: <https://pdfslide.net/engineering/casting-metal-parts-by-harold-hoffman.html> (accessed 28 June 2021).

23. Beeley P.R. Foundry technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001, 720 p. URL: [https://www.academia.edu/4161769/foundry\\_technology\\_by\\_peter\\_beeley](https://www.academia.edu/4161769/foundry_technology_by_peter_beeley) (accessed 28 June 2021).

24. Brown J.R. Foseco ferrous foundryman's handbook. 11th ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2000, 384 p. URL: <https://www.amazon.com/Foseco-Ferrous-Foundrymans-Handbook-Brown/dp/075064284X> (accessed 28 June 2021).

25. Hurst S. Metal casting: appropriate technology in the small foundry. London: Intermediate Technology Publications, 1996, 227 p. URL: <https://www.amazon.com/Metal-Casting-Appropriate-Technology-Foundry/dp/1853391972> (accessed 28 June 2021).

Получено 26.07.2021

Опубликовано 30.09.2021

### Сведения об авторах

**Гутько Юрий Иванович** (Луганск) – доктор технических наук, профессор, первый проректор Луганского государственного университета им. В. Даля, e-mail: [lguni.lit@yandex.ru](mailto:lguni.lit@yandex.ru).

**Войтенко Валерий Владимирович** (Луганск) – аспирант кафедры промышленного и художественного литья Луганского государственного университета им. В. Даля, e-mail: [valery.voytenko@outlook.com](mailto:valery.voytenko@outlook.com).

### About the authors

**Yuriy I. Gutko** (Lugansk) – Doctor of Technical Sciences, Professor, First Vice-Rector, Vladimir Dahl Lugansk State University, e-mail: [lguni.lit@yandex.ru](mailto:lguni.lit@yandex.ru).

**Valeriy V. Voytenko** (Lugansk) – Postgraduate Student, Department of Industrial and Art Foundry, Vladimir Dahl Lugansk State University, e-mail: [valery.voytenko@outlook.com](mailto:valery.voytenko@outlook.com).