



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-1-20-25>
УДК 621.743.42

Поступила 15.10.2023
Received 15.10.2023

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ НА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕСЧАНО-ЖИДКОСТЕКОВЫХ ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ

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

Приведены и обсуждаются результаты экспериментальных исследований влияния массовых долей мелкодисперсных металлических порошков, введенных в рецептуры стержневых смесей, на физико-технические характеристики песчано-жидкостекловых литейных стержней при воздействии высоких температур в процессе изготовления металлических отливок. Установлены зависимости физико-технических характеристик литейных стержней от массовых долей мелкодисперсных порошков алюминия, стали и бронзы. Выявлены значительные резервы улучшения выбиваемости литейных стержней перспективных составов из чугунных отливок за счет введения в стержневые смеси мелкодисперсных порошков алюминия или бронзы. Установлено, что наилучшая выбиваемость литейного стержня в сочетании с малым газовыделением и высокой газопроницаемостью может быть достигнута при комбинировании 15,0 мас. % измельченной морской ракушки и 0,5–1,0 мас. % алюминиевой пудры. Определены границы рационального применения оборотной смеси при приготовлении стержневой смеси.

Ключевые слова. Литейный стержень, стержневая смесь, выбиваемость, физико-технические характеристики, газовыделение, эксперимент, газопроницаемость, испытание на прочность.

Для цитирования. Гутько, Ю.И. Экспериментальные исследования влияния мелкодисперсных металлических порошков на физико-технические характеристики песчано-жидкостекловых литейных стержней / Ю. И. Гутько, В.В. Войтенко // *Литье и металлургия*. 2024. №1. С. 20–25. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-1-20-25>.

EXPERIMENTAL IMPACT STUDY OF ULTRA-FINE METAL POWDERS ON TECHNICAL CHARACTERISTICS AND PHYSICAL PROPERTIES OF FOUNDRY SODIUM SILICATE SAND CORES

Yu. I. GUTKO, V. V. VOYTENKO, Vladimir Dal Lugansk State University,
Lugansk, Lugansk People's Republic, Russia, 20A, Molodozhnyy block. E-mail: lguni.lit@yandex.ru

The results of the experimental impact study for the mass fractions of ultra-fine metal powders added into compositions of core mixtures on technical characteristics and physical properties of the foundry sodium silicate sand cores under influence of high temperatures during production of metal castings are presented and discussed. The dependences for technical characteristics and physical properties of the cores on the mass fractions of ultra-fine powders based on aluminum, steel, and bronze are established. The significant reserves for improving a knocking-out ability of the cores based on promising compositions for cast iron by adding ultra-fine powders of aluminum or bronze into core mixtures are revealed. It is established that the best knocking-out ability of the cores in combination with a low outgassing rate and a high gas permeability can be achieved by combining 15.0 wt. % crushed seashell and 0.5–1.0 wt. % aluminum powder. The boundaries for reasonable use of a recycled mixture in preparation of a core mixture are determined.

Keywords. Foundry core, core mixture, knocking-out ability, technical characteristics and physical properties, outgassing rate, experiment, gas permeability, structural robustness test.

For citation. Gutko Yu. I., Voytenko V. V. Experimental impact study of ultra-fine metal powders on technical characteristics and physical properties of foundry sodium silicate sand cores. *Foundry production and metallurgy*, 2024, no. 1, pp. 20–25. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-1-20-25>.

Введение

Песчано-жидкостекловый стержневой процесс применяется в промышленном и художественном чугунном литье [1–3]. Простота реализации, доступность, дешевизна, безопасность для здоровья человека и окружающей среды способствуют возобновлению интереса к песчано-жидкостекловому

стержневому процессу, несмотря на широкое распространение стержневых процессов, использующих в качестве связующих веществ синтетические смолы [4–7]. К недостаткам песчано-жидкостекольного стержневого процесса можно отнести плохую выбиваемость литейного стержня из металлической отливки, высокое газовыделение из объема литейного стержня при заполнении литейной полости чугуном и малую живучесть стержневой смеси. Улучшить физико-технические характеристики песчано-жидкостекольных литейных стержней можно за счет совершенствования рецептуры, например, путем введения таких компонентов, как стальной порошок, поверхностно-активные вещества, оборотная смесь и измельченная морская ракушка [8–10]. Такие компоненты способны существенно улучшить выбиваемость литейного стержня и снизить газовыделение из его объема при заполнении литейной полости расплавленным чугуном. Дальнейшие перспективы улучшения физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней, применяемых в чугунном литье, по мнению авторов, могут быть связаны с введением в стержневую смесь мелкодисперсных металлических порошков, которые будут выгорать при заполнении литейной полости расплавленным чугуном, улучшая выбиваемость и газопроницаемость литейного стержня, а также химически связывая выделяющиеся в его объеме углекислый газ и водяной пар.

Цель работы – исследование влияния мелкодисперсных металлических порошков на физико-технические характеристики песчано-жидкостекольных литейных стержней.

Методика проведения исследований

Для проведения экспериментальных исследований использовали оборудование для испытания литейных стержней на прочность при растяжении, сжатии и изгибе, выбиваемость из металлических отливок, а также оборудование для измерения теплопроводности, теплоемкости, газовыделения и коэффициента газопроницаемости. В качестве заполнителя в стержневой смеси применяли формовочный кварцевый песок марки 2K04A с модулем крупности 315–630 мкм, а в качестве связующего вещества – жидкое натриевое стекло с силикатным модулем 2,31–2,60 и плотностью 1,47–1,52 г/см³. При обработке результатов экспериментальных исследований применяли методы планирования эксперимента, статистическую обработку данных, теорию погрешностей, линейную и квадратичную аппроксимацию данных. Для сравнения выбиваемости песчано-жидкостекольных литейных стержней разных составов использовали десятибалльную шкалу выбиваемости, согласно которой наихудшей выбиваемости соответствовало 10 баллов, а наилучшей – 0.

Результаты исследований и их обсуждение

В табл. 1 приведены результаты испытаний песчано-жидкостекольных литейных стержней разных составов на выбиваемость из металлических отливок, показывающие влияние мелкодисперсных металлических порошков алюминия и бронзы, в том числе в сочетании с измельченной морской ракушкой, на выбиваемость. В табл. 2 приведены результаты испытаний литейных стержней аналогичных составов на прочность при растяжении, которые вместе с данными о выбиваемости из металлических отливок (табл. 1) позволяют оценить пригодность разных рецептур стержневых смесей для практического применения в литейном производстве.

Согласно полученным данным (табл. 1), введение в стержневую смесь 0,5–5,0 мас. % алюминиевой пудры улучшает выбиваемость песчано-жидкостекольных литейных стержней из металлических отливок на 6–8 баллов, а введение более 5,0 мас. % алюминиевой пудры ухудшает их выбиваемость. Наилучшей выбиваемостью (1–2 балла) обладают литейные стержни, содержащие 0,5–1,0 мас. % алюминиевой пудры.

Введение в стержневую смесь 1,0–15,0 мас. % бронзовой пудры также улучшает выбиваемость песчано-жидкостекольных литейных стержней из металлических отливок. Наилучшей выбиваемостью (на несколько баллов лучше, чем при введении 0,5–1,0 мас. % алюминиевой пудры) обладают литейные стержни, содержащие не менее 1,0 мас. % бронзовой пудры.

Введение в стержневую смесь 5,0–15,0 мас. % измельченной морской ракушки значительно улучшает выбиваемость песчано-жидкостекольных литейных стержней из металлических отливок (на 4 балла), а при дополнительном введении 0,5–1,0 мас. % алюминиевой пудры выбиваемость еще улучшается на 3–4 балла, достигая наилучшего значения при следующем составе стержневой смеси: формовочный кварцевый песок – 69,5 мас. %; жидкое натриевое стекло – 15,0; измельченная морская ракушка – 15,0; алюминиевая пудра – 0,5 мас. %.

Таблица 1. Результаты испытаний песчано-жидкостекольных литейных стержней на выбиваемость из металлических отливок

Состав стержневой смеси, мас. %						Выбиваемость, балл
формовочный кварцевый песок	портланд-цемент	жидкое натриевое стекло	измельченная морская ракушка	алюминиевая пудра	бронзовая пудра	
84,5	0	15,0	0	0,5	0	1
84,0	0	15,0	0	1,0	0	2
83,5	0	15,0	0	1,5	0	4
83,0	0	15,0	0	2,0	0	5
75,0	5,0	15,0	0	5,0	0	8
70,0	5,0	15,0	0	10,0	0	8
65,0	5,0	15,0	0	15,0	0	9
84,0	0	15,0	0	0	1,0	1
75,0	5,0	15,0	0	0	5,0	4
70,0	5,0	15,0	0	0	10,0	5
65,0	5,0	15,0	0	0	15,0	6
75,0	0	15,0	5,0	5,0	0	3
70,0	0	15,0	10,0	5,0	0	2
65,0	0	15,0	15,0	5,0	0	1
85,0	0	15,0	0	0	0	7
70,0	0	15,0	15,0	0	0	3

Таблица 2. Результаты испытаний песчано-жидкостекольных литейных стержней на прочность при растяжении

Состав стержневой смеси, мас. %						Предел прочности при растяжении, МПа
формовочный кварцевый песок	портланд-цемент	жидкое натриевое стекло	измельченная морская ракушка	алюминиевая пудра	бронзовая пудра	
84,5	0	15,0	0	0,5	0	0,386
84,0	0	15,0	0	1,0	0	0,143
83,5	0	15,0	0	1,5	0	0,291
83,0	0	15,0	0	2,0	0	0,176
75,0	5,0	15,0	0	5,0	0	0,224
70,0	5,0	15,0	0	10,0	0	0,274
65,0	5,0	15,0	0	15,0	0	0,311
84,0	0	15,0	0	0	1,0	0,053
75,0	5,0	15,0	0	0	5,0	0,301
70,0	5,0	15,0	0	0	10,0	0,201
65,0	5,0	15,0	0	0	15,0	0,278
70,0	0	15,0	5,0	5,0	5,0	0,377
74,5	0	15,0	10,0	0,5	0	0,346
69,0	0	15,0	15,0	1,0	0	0,126
83,0	0	15,0	0	2,0	0	0,270
70,0	0	15,0	15,0	0	0	0,402

Необходимо отметить, что выбиваемость песчано-жидкостекольных литейных стержней из металлических отливок может быть еще улучшена путем снижения массовой доли жидкого натриевого стекла до 12,0 мас. % и менее, но при этом снижаются манипуляторная прочность и пределы прочности литейных стержней при растяжении, сжатии и изгибе, что может привести к повышению доли производственного брака при изготовлении литейных стержней и отливок.

При введении в песчано-жидкостекольную стержневую смесь более 1,0–2,0 мас. % алюминиевой пудры следует учитывать, что образующийся в результате химической реакции водород способствует вспениванию стержневой смеси, что приводит к увеличению ее объема в стержневом ящике и выдавливанию некоторой ее части наружу. Введение измельченной морской ракушки в стержневую смесь существенно повышает газопроницаемость литейного стержня, что способствует улучшению выхода водорода из его

объема, в результате чего объем стержневой смеси в стержневом ящике не изменяется. Таким образом, комбинирование таких добавок, как алюминиевая пудра и измельченная морская ракушка, позволяет существенно улучшить выбиваемость литейных стержней из металлических отливок, сохраняя на достаточном уровне их манипуляторную и максимальную прочности (табл. 2).

По результатам экспериментов установлены зависимости физико-технических характеристик песчано-жидкостекольных литейных стержней от массовых долей измельченной морской ракушки (0–25,0 мас. %) и алюминиевой пудры (0–2,0 мас. %).

Коэффициент теплопроводности песчано-жидкостекольного литейного стержня (состав, мас. %: формовочный кварцевый песок – 84,5– a ; жидкое натриевое стекло – 15,0; измельченная морская ракушка – a ; алюминиевая пудра – 0,5), Вт/(м·°C):

$$K_s(T) = K_a(a) + 6 \cdot 10^{-4} T;$$

$$K_a(a) = 0,6894 - 0,0248a + 5,7029a^2,$$

где T – температура литейного стержня, °C; a – массовая доля измельченной морской ракушки в стержневой смеси, мас. %.

Плотность песчано-жидкостекольного литейного стержня, кг/м³:

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

Теплоемкость песчано-жидкостекольного литейного стержня, Дж/(кг·°C):

$$C_s(T) = C_a(a) + 25 \cdot 10^{-3} T;$$

$$C_a(a) = 417,53 + 28,46a - 0,24a^2.$$

Предел прочности песчано-жидкостекольного литейного стержня при растяжении, МПа:

$$\sigma_2(T) = \sigma_a(a) - 1,32 \cdot 10^{-3} T + 2,4 \cdot 10^{-6} T^2;$$

$$\sigma_a(a) = 2,1 - 0,052a.$$

Газовыделение из объема песчано-жидкостекольного литейного стержня, м³/м³:

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

Коэффициент газопроницаемости песчано-жидкостекольного литейного стержня, D :

$$M(a) = 7,92 + 0,881a.$$

Выбиваемость песчано-жидкостекольного литейного стержня из металлической отливки, балл:

$$B(a) = 7,00 - 0,24a.$$

Выбиваемость песчано-жидкостекольного литейного стержня (состав, мас. %: формовочный кварцевый песок – 85,0– b ; жидкое натриевое стекло – 15,0; алюминиевая пудра – b), балл:

$$D(b) = 0,278 + 1,44b.$$

По результатам экспериментальных исследований можно дать следующие рекомендации по выбору рецептуры стержневой смеси для изготовления песчано-жидкостекольных литейных стержней, применяемых в чугунном литье. Первоначально задаются требования по манипуляторной прочности литейного стержня с учетом класса его сложности, исходя из которых выбирается массовая доля жидкого натриевого стекла в стержневой смеси. Затем по объему литейного стержня и выбранной массовой доле жидкого натриевого стекла рассчитываются ожидаемое газовыделение и ожидаемый коэффициент газопроницаемости, а также определяются размеры и конфигурация каналов для отвода углекислого газа и водяного пара при заполнении литейной полости металлическим расплавом с учетом дополнительных компонентов стержневой смеси, таких как феррохромовый шлак, портландцемент, измельченная морская ракушка, угольная пыль, древесные опилки и оборотная смесь. После этого выбирается массовая доля алюминиевой или бронзовой пудры исходя из класса сложности литейного стержня и требований к выбиваемости из металлической отливки.

Выводы

Наилучшие результаты достигаются при использовании песчано-жидкостекольных стержневых смесей, содержащих от 5,0 до 20,0 мас. % оборотной смеси или от 5,0 до 15,0 мас. % измельченной морской ракушки. Также в стержневую смесь может быть введено от 2,0 до 4,0 мас. % феррохромового шлака

или портландцемента для повышения манипуляторной прочности литейных стержней. Для значительного улучшения выбиваемости литейных стержней из металлических отливок в состав стержневой смеси целесообразно вводить от 0,5 до 1,0 мас. % алюминиевой или бронзовой пудры. Введение в стержневую смесь от 2,0 до 10,0 мас. % металлического порошка, полученного при переработке отходов шлифования сталей, также способствует улучшению выбиваемости литейных стержней, но менее эффективно, чем при введении алюминиевой пудры. Следует учитывать, что при введении в стержневую смесь более 10,0 мас. % оборотной смеси начинает проявляться ее усадка в стержневом ящике, что может приводить к образованию трещин. Введение измельченной морской ракушки существенно снижает теплопроводность и газовыделение из объема литейного стержня, а также повышает газопроницаемость. Введение оборотной смеси способствует улучшению выбиваемости и снижению газовыделения из объема литейного стержня при заполнении литейной полости металлическим расплавом. При достаточной манипуляторной прочности наилучшими физико-техническими характеристиками обладают литейные стержни, изготовленные из стержневой смеси следующего состава: наполнитель – формовочный кварцевый песок; связующее вещество – жидкое натриевое стекло; измельченная морская ракушка – 15,0 мас.%; алюминиевая пудра – 0,5–1,0 мас. %. Отверждение литейного стержня происходит путем продувки углекислого газа через стержневой ящик с последующей сушкой в сушильном шкафу. Массовая доля жидкого натриевого стекла выбирается исходя из требований, предъявляемых к манипуляторной прочности, и с ее учетом корректируется массовая доля формовочного кварцевого песка. При использовании оборотной смеси ее массовая доля не должна превышать 40,0 мас.%, рекомендуется вводить 20,0 мас.%. Для экономии углекислого газа его прокачка через стержневой ящик может быть заменена выдержкой стержневого ящика в газовой камере, заполненной углекислым газом при избыточном давлении 2 атм. Необходимое время выдержки литейного стержня в углекислотной газовой среде может быть определено по величине расхода углекислого газа. Момент начала снижения расхода углекислого газа свидетельствует о достижении необходимой выдержки литейного стержня в среде газообразного отвердителя. Если не требуется экономия времени на изготовление литейных стержней, то можно использовать воздух рабочей зоны литейного цеха, имеющий достаточную для отверждения жидкого натриевого стекла концентрацию углекислого газа, вместо чистого углекислого газа или углекислотно-воздушной смеси. Такой воздух можно прокачивать через сушильный шкаф при температуре 60–160 °С, забирая его из зоны заполнения литейной полости металлическим расплавом, в течение нескольких часов. Это позволит экономить углекислый газ и снизить его выбросы в окружающую среду.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Илларионов, И. Е.** Жидкостекольные смеси, отверждаемые продувкой углекислым газом / И. Е. Илларионов, Н. В. Петрова // Тр. Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р. Е. Алексеева. – 2011. – № 2 (87). – С. 208–213.
2. **Кукуй, Д. М.** Современные технологические процессы производства стержней / Д. М. Кукуй, Д. А. Кудин // Литье и металлургия. – 2000. – № 2. – С. 9–12.
3. Performances of sodium silicate sand hardened by microwave heating / X.-L. Zan [et al.] // Foundry. – 2008. – № 4 (57). – P. 384–390.
4. **Саначева, Г. С.** Органические связующие в литейном производстве / Г. С. Саначева, Н. М. Вострикова, И. В. Дубова // Журн. Сибир. федер. ун-та: Техника и технологии. – 2012. – № 5. – С. 799–804.
5. «Холодные» стержни – перспектива повышения качества литейной продукции ремонтно-механической базы Ачинского филиала РИК / Г. С. Саначева [и др.] // Журн. Сибир. федер. ун-та: Техника и технологии. – 2014. – № 4. – С. 456–461.
6. **Щетинин, А. А.** Преимущества и перспективы применения холоднотвердеющих смесей при изготовлении ответственных и высоконагруженных отливок для авиационной промышленности / А. А. Щетинин, В. А. Аммер, Ю. Ю. Турищев // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2017. – № 3 (13). – С. 68–70.
7. **Псиминос, А. Х.** Смолы холодного отверждения с незначительным выделением вредных веществ и запаха (Cold-Box), абсолютно не имеющие ароматических растворителей / А. Х. Псиминос, Г. Эдер, М. М. Сипос // Литье и металлургия. – 2011. – № 2 (60). – С. 23–31.
8. **Гутько, Ю. И.** Исследование прочности и выбиваемости песчано-жидкостекольных литейных стержней, содержащих стальной порошок / Ю. И. Гутько, В. В. Войтенко // Теория и технология металлургического производства. – 2022. – № 2 (41). – С. 12–17.
9. **Гутько, Ю. И.** Исследование физико-технических характеристик жидкостекольных литейных стержней с добавлением измельченной морской ракушки, ПАВ и оборотной стержневой смеси / Ю. И. Гутько, В. В. Войтенко // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки материалов в машиностроении: сб. науч. тр. – 2021. – № 4 (37). – С. 35–51.
10. **Гутько, Ю. И.** Экспериментальные исследования физико-технических свойств жидкостекольных литейных стержней, содержащих оборотную стержневую смесь и морскую ракушку / Ю. И. Гутько, В. В. Войтенко // Научный форум: Тенденции развития науки и общества: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. (29 окт. 2021 г.). – Кемерово: Западно-Сибирский научный центр, 2021. – С. 53–56.

REFERENCES

1. Illarionov I. E., Petrova N. V. Zhidkostekol'nye smesi, otverzhdaemye produvkoy uglekislym gazom [Liquid glass mixtures cured by blowing carbon dioxide]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. R. E. Alekseeva*. = *Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseeva*, 2011, no. 2 (87), pp. 208–213.
2. Kukuj D. M., Kudin D. A. Sovremennye tehnologicheskie processy proizvodstva sterzhnej [Modern technological processes for rod production]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2000, no. 2, pp. 9–12.
3. Zan X.-L., Fan Z.-T., Wang J.-N., Pan D. Performances of sodium silicate sand hardened by microwave heating. *Foundry*, 2008, no. 4 (57), pp. 384–390.
4. Sanacheva G. S., Vostrikova N. M., Dubova I. V. Organicheskie svjazujushhie v litejnom proizvodstve [Organic binders in foundry production]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta: Tehnika i tehnologii = Journal of the Siberian federal university: Engineering and technology*, 2012, no. 5, pp. 799–804.
5. Sanacheva G. S., Dubova I. V., Vostrikova N. M., Leont'ev E. G., Gil'manshina T. R. «Holodnye» sterzhni – perspektiva povyshenija kachestva litejnoj produkcii remontno-mehaničeskoj bazy Achinskogo filiala RIK [“Cold” cores – a prospect for improving the quality of foundry products at the repair and mechanical base of the Achinsk branch of the RIC]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta: Tehnika i tehnologii = Journal of the Siberian federal university: Engineering and technology*, 2014, no. 4, pp. 456–461.
6. Shchetinin A. A., Ammer V. A., Turischev Yu. Yu. Preimushhestva i perspektivy primenenija holodnotverdejushhijh smesej pri izgotovlenii otvetstvennyh i vysokonagruzhennyh otlivok dlja aviacionnoj promyshlennosti [Advantages and prospects for the use of cold-hardening mixtures in the manufacture of critical and highly loaded castings for the aviation industry]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Bulletin of Voronezh state technical university*, 2017, no. 3 (13), pp. 68–70.
7. Psimenos A. H., Jeder G., Sipos M. M. Smoly holodnogo otverzhdenija s neznachitel'nym vydeleniem vrednyh veshhestv i zapaha (Cold-Box), absolyutno ne imejushhie aromatičeskih rastvoritelej [Cold-curing resins with low emission of harmful substances and odor (Cold-Box), absolutely free of aromatic solvents]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2011, no. 2 (60), pp. 23–31.
8. Gutko Yu. I., Voytenko V. V. Issledovanie prochnosti i vybivaemosti peschano-zhidkostekol'nyh litejnyh sterzhnej, sodержashhijh stal'noj poroshok [Study of the strength and knockout of sand-liquid glass foundry cores containing steel powder]. *Teorija i tehnologija metallurgičeskogo proizvodstva = Theory and technology of metallurgical production*, 2022, no. 2 (41), pp. 12–17.
9. Gutko Yu. I., Voytenko V. V. Issledovanie fiziko-tehnicheskijh harakteristik zhidkostekol'nyh litejnyh sterzhnej s dobavleniem izmel'čennoj morskoi rakushki, PAV i oborotnoj sterzhnevoj smesi [Study of the physical and technical characteristics of liquid glass foundry cores with the addition of crushed seashells, surfactants and recycled core mixture]. *Resursosberegajushhie tehnologii proizvodstva i obrabotki davleniem materialov v mashinostroenii: sb. nauch. tr. = Resource-saving technologies for production and pressure processing of materials in mechanical engineering: Collection of scientific papers*, 2021, no. 4 (37), pp. 35–51.
10. Gutko Yu. I., Voytenko V. V. Jeksperimental'nye issledovanija fiziko-tehnicheskijh svojstv zhidkostekol'nyh litejnyh sterzhnej, sodержashhijh oborotnuju sterzhnevuju smes' i morskiju rakushku [Experimental studies of the physical and technical properties of liquid glass foundry cores containing recycled core mixture and seashell]. *Nauchnyj forum: Tendencii razvitija nauki i obshhestva: sb. materialov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 29 okt. 2021 g. = Scientific forum: Trends in the development of science and society: collection of materials from the international scientific and practical conference, oct. 29, 2021*. Kemerovo, Zapadno-Sibirskij nauchnyj centr Publ., 2021, pp. 53–56.