



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-27-32>
УДК 621.745

Поступила 24.03.2026
Received 24.03.2026

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СВОЙСТВА ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ

С. А. КУЛИКОВ, ОАО «Минский тракторный завод», г. Минск, Беларусь, ул. Долгобродская, 29.
E-mail: s.kulikov@mtz.by

Ю. А. КУЛИКОВ, ОАО «УКХ «Минский моторный завод», г. Минск, Беларусь, ул. Ваупшасова, 4.
E-mail: ogmet@mmz-motor.by

Повсеместное внедрение ХТС привело к тому, что «горячие» процессы изготовления литейных стержней постепенно вытесняются. Считается, что для ХТС в предварительном нагреве нет необходимости и ведет к необоснованному увеличению себестоимости. В настоящем исследовании показано, что воздействие щадящей температуры (в пределах 200–250 °С) положительно влияет на свойства литейных стержней вне зависимости от процесса их получения. Это связано с удалением растворителей из состава связующих с последующей релаксацией в структуре их пленок.

Ключевые слова. Литейные стержни, температура, качество, СЭМ.

Для цитирования. Куликов, С. А. Влияние температуры на свойства литейных стержней / С. А. Куликов, Ю. А. Куликов // Литье и металлургия. 2026. № 2. С. 27–32. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-27-32>.

THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE PROPERTIES OF CASTING RODS

S. A. KULIKOV, Minsk Tractor Plant, Minsk, Belarus, 29, Dolgobrodskaya str. E-mail: s.kulikov@mtz.by

Yu. A. KULIKOV, Minsk Motor Plant, Minsk, Belarus, 4, Vaupshasova str.

The widespread adoption of cold-melting processes has gradually replaced “hot” core production processes. It is believed that preheating is unnecessary for cold-melting processes and leads to an unjustified increase in production costs. This study demonstrates that exposure to gentle temperatures (in the range of 200–250 °C) positively impacts the properties of cores, regardless of the production process. This is due to the removal of solvents from the binders and subsequent relaxation of their film structure.

Keywords. Casting cores, temperature, quality, SEM.

For citation. Kulikov S. A., Kulikov Yu. A. The influence of temperature on the properties of casting rods. Foundry production and metallurgy, 2026, no. 2, pp. 27–32. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-27-32>.

Введение

Формовочные и стержневые смеси позволяют получать качественную продукцию только при определенных параметрах технологического процесса. Например, для ручной формовки или встряхивающих формовочных машин влажность смеси может достигать 6%, в то время как для автоматических формовочных линий с большими усилиями прессования такое значение влажности явно избыточно. Одна и та же смесь при производстве чугунных отливок позволяет получить качественную литую поверхность, а при производстве сталей, в особенности марганцовистых, приведет к появлению неотделимого пригара. Таким образом, рецептуры смесей разрабатываются под конкретные задачи с учетом специфики производства. В то же время не всегда возможно разработать универсальную смесь, позволяющую получать качественные отливки по всей номенклатуре.

Развитие технологии литейного производства движется в сторону исключения стержневых смесей, отверждаемых под действием температуры. Это было вызвано целым спектром причин: высокой себестоимостью, низкой размерной точностью и снижением производительности. Внедрение холоднотвердеющих смесей (ХТС) позволило решить сразу все эти задачи. Однако это вовсе не означает, что ХТС во всем превосходят смеси, отверждаемые температурой.

Как правило, основной компонент смесей – кварцевый песок. В свою очередь кварц – это одна из полиморфных модификаций кремнезема. В зависимости от температуры и давления устойчивой

формой кварца до 573 °С является β-кварц, выше этой температуры – α-кварц. В специализированной литературе эти модификации называют соответственно низким и высоким кварцем [1]. Температура α-β-перехода для кварца колеблется в пределах 1–3 °С в зависимости от генезиса [2]. Кроме того, α- и β-кварц могут существовать в различных модификациях (SiO₂)_n: тридимит, кристобалит. Несмотря на то что все превращения кварца протекают с изменением объема (до 16 % для α-тридимита), только β-α-переход протекает с достаточной скоростью, чтобы оказать существенное влияние на качество литой поверхности [3]. ГОСТ 2138-91 «Пески формовочные. Общие технические условия» устанавливает следующие качественные показатели для формовочных кварцевых песков: массовая доля глинистой составляющей, %; массовая доля диоксида кремния, %; коэффициент однородности, %; средний размер зерна, мм. В стержневых процессах наиболее важными параметрами являются содержание глинистой составляющей и массовая доля диоксида кремния. Повышение содержания глины (пыли) в песке приведет к увеличению расхода связующих компонентов и резкому возрастанию газотворной способности смеси. Снижение содержания диоксида кремния в песке происходит, как правило, при его естественном засорении оксидами металлов, например, Fe₂O₃. В этом случае воздействие температуры может спровоцировать реакции восстановления железа и привести к пригару. Гранулометрический состав песков без учета металлостатического давления, создаваемого литниковой системой, может также явиться причиной пригара [4].

В части связующих компонентов влияние температуры значительно сложнее ввиду широкого спектра факторов, пробелов в теории прочности стержневых смесей. В первом приближении можно считать, что песчинки смеси в стержнях склеены связующими компонентами. Воздействие температуры на клеевое соединение будет комплексным и зависит от сил адгезии и когезии, характера распределения связующих по поверхности зерен. Отверждение ХТС протекает по реакции поликонденсации, в процессе которой из малых молекулярных групп путем укрупнения образуется трехмерная сетка полимера [5]. Для удобства применения смолы, как правило, поставляются в жидком виде. До процесса отверждения прочность смеси определяется силами адгезии и разрыв пленки связующего наиболее вероятен. После отверждения силы когезии связующего намного превышают адгезию и разрушение стержня будет протекать путем отрыва пленки связующего от поверхности зерен наполнителя. В процессе набора прочности силы адгезии и когезии конкурируют между собой. Все эти положения были разработаны и экспериментально подтверждены еще в 50-х годах [6]. Причем было установлено, что повышение температуры связующего с последующим медленным охлаждением положительно влияет на прочность образующихся пленок связующих. Для каждого связующего в зависимости от его состава существуют своя оптимальная температура нагрева и толщина наносимого слоя. С позиции теории электронного слоя, возникающего на поверхности склеиваемых поверхностей, клеевой слой тем прочнее, чем меньше его толщина. Действие температуры объясняется процессами релаксации в пленках клеевого слоя. Если в составе смол и катализаторов присутствует растворитель, удаление которого не приведет к разрушению полимера, нагрев связующего приведет к увеличению сил когезии. Напротив, удаление структурно связанного растворителя приведет к растрескиванию пленки связующего и уменьшению прочности.

За истекший период данные о влиянии предварительного нагрева на свойства литейных стержней весьма ограничены и дальнейшие исследования в этом направлении актуальны и способствуют улучшению качества получаемых отливок.

Методика проведения экспериментов

В случае использования аддитивной технологии (АТ) стержневую смесь приготавливали на лопастном смесителе, входящем в комплекс 3D-принтера FHZL (КНП), на котором методом ВJ печатали лабораторные образцы («восьмерки»). По технологии Cold-box-amine, фуран-процессу и тепловой сушки смесь приготавливали на лабораторном лопастном смесителе LMB-s (MULTISERW-Morek, Польша). Лабораторные образцы для исследований по Cold-box-amine изготавливали на лабораторной стержневой машине модели LUT-c, по фуран-процессу и методом тепловой сушки – вручную в стержневом ящике. Прочность при растяжении стандартных образцов проверяли на установке LRu-2e, газотворную способность смесей – на установке PR-45 (все приборы также производства MULTISERW-Morek, Польша). Гранулометрический состав контролировали по ГОСТ 2138-91 на установке 029 (Россия). Тепловую обработку стержней проводили в сушильном шкафу марки SNOL 58/350 (Литва) со встроенным терморегулятором. Исследование морфологии образцов выполняли на аттестованном сканирующем электронном

микроскопе (СЭМ) высокого разрешения «Mira 3» фирмы «Tescan» (Чехия) с рентгеноспектральным анализатором фирмы «Oxford Instruments Analytical» (Великобритания). Ускоряющее напряжение при съемке составляло 20 кВ. Увеличение и другие параметры съемки указаны в информационной строке внизу каждого кадра.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Для изготовления лабораторных образцов «восьмерок» по обычным («традиционным») технологиям, т. е. когда стержневая смесь заполняет полость стержневого ящика, применяли формовочный песок Гомельского месторождения марки $1K_1O_3025$ ГОСТ 2138-91 с рассредоточенным зерновым составом, для технологии АТ – марки $1K_1O_101$ ГОСТ 2138-91 (РФ) с концентрированной зерновой основой. Более подробно о использованных песках, сравнении обычного фуран-процесса и технологии ВJ указано в [7], в том числе и о примененных смолах. К сожалению, на данный момент отсутствуют белорусские связующие материалы, поэтому во всех случаях для обычных технологий применяли материалы российских производителей. Рецептуры смесей приведены в табл. 1 (порядковый номер компонентов смеси соответствует очередности их ввода в смеситель).

Т а б л и ц а 1. Рецептуры стержневых смесей

Порядковый номер	Компонент смеси	Массовая доля, %
Cold-box-amine		
1	Песок формовочный	97,6
2	Смола	1,2
3	Полиизоцианат	1,2
4	Катализатор (диметилэтиламин)	1мл на 1 кг смеси
Фуран-процесс (обычный)		
1	Песок формовочный	98,2
2	Катализатор (ортофосфорная кислота)	0,6
3	Смола	1,2
Фуран-процесс (АТ)		
1	Песок формовочный	96,7
2	Катализатор	1,3
3	Смола	2
Тепловая сушка		
1	Песок формовочный	92,84
2	ЛСТ	5,16
3	УСК-1	2

После изготовления стандартных образцов их выдерживали при комнатной температуре не менее 24 ч для набора максимальной прочности. В части тепловой сушки стержни отверждали путем выдержки в лабораторной печи при температуре 220 °С в течение 30 мин. После остывания образцы выдерживали не менее 24 ч. Далее часть стандартных образцов подвергали испытаниям на прочность при растяжении. Оставшуюся часть выдерживали в лабораторной печи при температуре 220 °С в течение 30 мин, после остывания образцов также измеряли их прочность при растяжении (кроме стержней по тепловой сушке). За результат испытаний принимали среднее арифметическое трех измерений. Затем определяли газотворную способность смеси. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Результаты испытаний стержневых смесей

Тип смеси	Прочность стандартных образцов при растяжении, МПа		Газотворная способность смеси, см ³ /г	
	без тепловой обработки	после выдержки в печи	без тепловой обработки	после выдержки в печи
Cold-box-amine	2,05	2,23	7,2	6,2
Фуран-процесс (обычный)	1,47	1,24	4,9	3,2
Фуран-процесс (АТ)	1,35	1,65	8,3	7,3
Тепловая сушка	0	1,47	14,6	4,4

Из таблицы видно, что результат воздействия температуры на свойства литейных стержней зависит от множества факторов. Для Cold-box-amine-процесса выдержка стержней в печи привела к повышению прочности на 10% и снижению газотворной способности на 14%. Для обычного фуран-процесса произошло снижение прочности на 15% и газотворности на 35%, для фуран-процесса по АТ – к увеличению прочности на 19% и снижению газотворности на 12%. Стержневая смесь, отверждаемая тепловой сушкой, не имеет прочности на разрыв без воздействия повышенных температур. Как сказано ранее, это обусловлено низкой когезией связующего. После термической обработки происходит увеличение работы когезии, формируется трехмерный каркас связующего и газотворная способность смеси уменьшается на 70%. Из этих данных можно сделать предварительный вывод, что температурная обработка литейных стержней до 220°C в общем случае положительно влияет на их свойства.

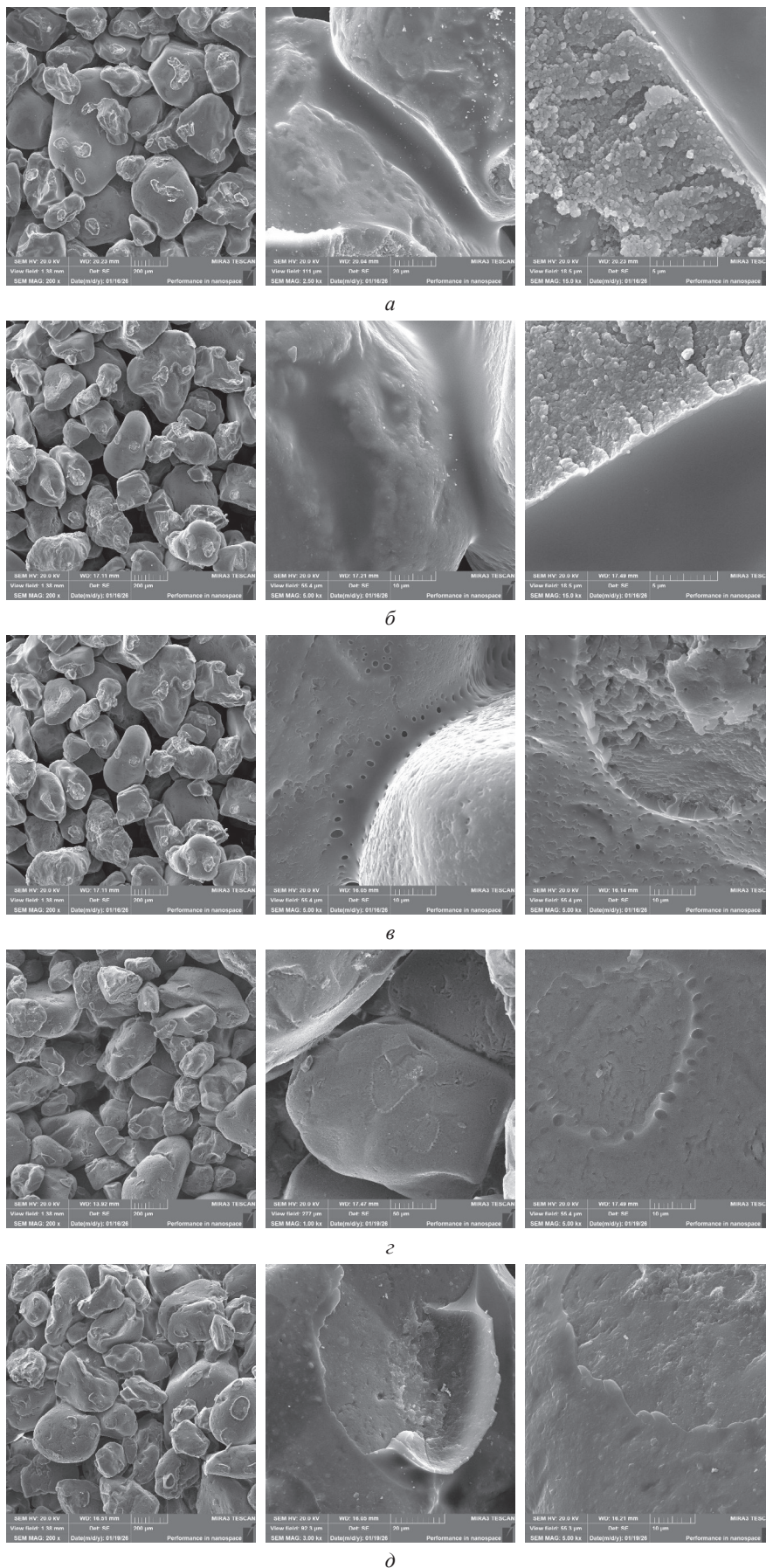
Кроме того, после испытания стержневой смеси на прочность при растяжении поверхность излома нескольких образцов была исследована при помощи сканирующей электронной микроскопии. Результаты представлены на рисунке.

Как видно из рисунка, все литейные стержни при растяжении вне зависимости от технологического процесса их получения разрушаются по пятну контакта между песчинками. Отличия заключаются в морфологии поверхности нанесенных на песчинки связующих композиций и структуре их пленок. При Cold-box-amine-процессе поверхность связующих гладкая, без особенностей, толщина слоя между зёрнами песка может достигать 10 мкм. Воздействие тепловой обработки существенно не сказывается на морфологии поверхности связующего. Поэтому можно предположить, что по истечении 24 ч в стержнях по Cold-box-amine-процессу не только заканчивается поликонденсация, но и протекает некоторая релаксация (уравновешивание) пленок связующих. Повышение прочности Cold-box-amine стержней после нагрева связано, по-видимому, с удалением растворителя из компонента А (смолы).

Действие температуры на стержни по фуран-процессу гораздо сложнее. При обычном фуран-процессе снижение прочности связано с множеством дефектов на поверхности и в структуре пленок связующих. Необходимо отметить, что количество дефектов в образцах превышает таковое в работе [7], что связано с технологией фуран-процесса. При использовании в качестве отвердителя ортофосфорной кислоты она может быть разбавлена водой, что влияет на скорость отверждения и полноту протекания поликонденсации. Можно было бы предположить, что произошел «пережог» стержней, однако данные СЭМ этого не подтверждают: в настоящем исследовании проведение тепловой обработки привело к удалению растворителя и повышенной хрупкости пленок связующих. Видно, что воздействие тепловой обработки приводит к уменьшению дефектов поверхности, но оно явно недостаточно для устранения большого количества рыхлот прямо по пятну контакта. При фуран-процессе по АТ вместо ортофосфорной кислоты был использован активатор на основе ксилосульфокислоты с различными добавками. Морфология поверхности таких стержней [7] позволяет сделать вывод, что повышение прочности после тепловой обработки для фуран-процесса по АТ связано с удалением растворителя без нарушения сплошности пленки связующего.

Для стержней по тепловой сушке воздействие температуры приводит к формированию цельной трехмерной структуры связующего. Видно, что вязкость связующих компонентов была понижена, что позволило получить наименьшую по толщине пленку. Однако силы адгезии были минимальными, о чем говорит морфология пятна контакта после отрыва песчинки. Последнее связано, по-видимому, с различием химии компонентов связующих материалов и, как следствие, в различной структуре их пленок.

В действующем производстве литейные стержни по ХТС подвергаются сушке только после нанесения водных противопоригарных покрытий. Считается, что для ХТС просто нет необходимости пропускать стержни через сушило ввиду завершенности процессов поликонденсации. Результаты настоящего исследования показывают, что воздействие щадящей температуры положительно влияет на свойства литейных стержней, изготовленных из кварцевого песка. Под щадящей подразумевается температура, достаточная для удаления структурно несвязанных компонентов из состава связующих материалов, но недостаточная для начала процессов разрушения пленок связующих или протекания полиморфных превращений кварца. Согласно [6], для сокращения времени обработки и обеспечения протекания процессов релаксации температура должна находиться в пределах 200–250 °C. В работе [8] указано, что основным фактором, определяющим дефектность стержневых смесей в части газовых раковин и пористости, является состав связующих, а уже потом их количество. Чем больше в составе связующих компонентов летучих веществ с низкой температурой деструкции, тем больше вероятность образования дефектов. Вследствие этого если применяются качественные смолы и катализаторы с минимальным содержанием растворителей, то температура обработки стержней может быть повышена.



Результаты СЭМ поверхности излома образцов:
 а, б – Cold-box-amine-процесс соответственно до и после тепловой обработки; в, г – фуран-процесс (обычный) соответственно до и после тепловой обработки; д – тепловая сушка после отверждения

Выводы

1. Вне зависимости от технологического процесса получения стержневой смеси литейные стержни разрушаются по пятну контакта между зернами огнеупорного наполнителя. Обеспечение необходимого гранулометрического состава позволяет получить максимальную прочность литейного стержня при минимальном количестве связующего в сочетании с высокой газопроницаемостью.

2. Выдержка литейных стержней при температуре 200–250 °С позволяет повысить их прочность, снизить газотворную способность. Это относится к любой технологии получения стержней как «горячих» процессов, так и ХТС. Например, при изготовлении стержней по технологии Hot-box рекомендуется выдерживать стержни в нагретой оснастке, а стержни по Cold-box-amine- или фуран-процессу проводить через сушило.

3. Улучшение свойств стержней при воздействии температуры обусловлены удалением из состава связующих структурно свободных растворителей и эффектов релаксации.

4. Повышение температуры выше 250 °С или слишком продолжительное время выдержки в печи может привести к необратимым процессам в пленках связующих и повышению, а не снижению дефектности.

5. В некоторых случаях (сложная конфигурация, повышенные требования потребителей и др.) переход обратно от ХТС к Hot-box или тепловой сушке позволяет снизить дефектность отливок в несколько раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. **О'Доноху, М.** Кварц / М. О'Доноху; пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 136 с.
2. **Кац, М. Я.** Кварц кристаллических горных пород (минералогические особенности и плотностные свойства) / М. Я. Кац, И. М. Симанович. – М.: Наука, 1974. – 235 с.
3. **Петриченко, А. М.** Термостойкость литейных форм / А. М. Петриченко, А. А. Померанец, В. В. Парфенова. – М.: Машиностроение, 1982. – 232 с.
4. **Куликов, С. А.** Критерии оценки эффективности бентонитов при производстве отливок ответственного назначения / С. А. Куликов, Ф. И. Рудницкий, В. А. Шумигай // Литье и металлургия. – 2023. – № 4. – С. 43–47.
5. **Васильев, В. А.** Физико-химические основы литейного производства: учебник / В. А. Васильев. – М.: МТГУ, 1994. – 320 с.
6. Вопросы теории литейных процессов. – М.: Машгиз, 1960. – 694 с.
7. **Куликов, С. А.** Анализ свойств литейных стержней, изготовленных по фуран-процессу методом аддитивных технологий и традиционным способом / С. А. Куликов, Ю. А. Куликов // Литье и металлургия. – 2025. – № 3. – С. 29–35.
8. **Moore, J. J.** An examination of the gas evolution characteristics of various synthetic core binders / J. J. Moore, R. Mason // Brit. Foundryman. – 1981. – Vol. 74, no. 9. – P. 189–195.

REFERENCES

1. **O'Donohu M.** *Kvarc* [Quartz]. Moscow, Mir Publ., 1990, 136 p.
2. **Katz M. Ya., Simanovich I. M.** *Kvarc kristallicheskih gornyh porod (mineralogicheskie osobennosti i plotnostnye svoystva)* [Quartz of crystalline rocks (mineralogical features and density properties)]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 235 p.
3. **Petrichenko A. M., Pomeranets A. A., Parfenova V. V.** *Termostojkost' litejnyh form* [Heat resistance of casting molds]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982, 232 p.
4. **Kulikov S. A., Rudnitsky F. I., Shumigay V. A.** Kriterii ocenki effektivnosti bentonitov pri proizvodstve otlivok otvetstvennogo naznacheniya [Criteria for evaluating the effectiveness of bentonites in the production of custom castings]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 4, pp. 43–47.
5. **Vasiliev V. A.** *Fiziko-himicheskie osnovy litejnogo proizvodstva: uchebnik* [Physicochemical foundations of foundry production: textbook]. Moscow, MTGU Publ., 1994, 320 p.
6. *Voprosy teorii litejnyh processov* [Questions of the theory of foundry processes]. Moscow, Mashgiz Publ., 1960, 694 p.
7. **Kulikov S. A., Kulikov Yu. A.** Analiz svoystv litejnyh stержnej, izgotovlennyh po furan-processu metodom additivnyh tekhnologij i tradicionnym sposobom [Analysis of properties of casting rods manufactured by the furan process by additive technologies and traditional method]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2025, no. 3, pp. 29–35.
8. **Moore J. J., Mason R.** An examination of the gas evolution characteristics of various synthetic core binders. *Brit. Foundryman*, 1981, vol. 74, no. 9, pp. 189–195.