



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-40-46>
УДК 621.74

Поступила 28.01.2025
Received 28.01.2025

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ МАГНЕТИТА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПЕСЧАНО-СМОЛЯНЫХ СМЕСЕЙ

*С. В. КОРЕНЮГИН, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: korenugin@bntu.by, тел.: +375 (017) 293–92–04*
*С. Л. РОВИН, Metallurgical Scientific Center, Uzmetkombinat JSC,
г. Бекабад, Узбекистан, ул. Сырдарье, 1. E-mail: s.rovin@uzbeksteel.uz, тел.: +998 (90) 830–75–05*
*П. П. КУЗЕНКОВ, SFR Group of Companies, Russia, St. Petersburg,
Kolpino, ul. Finlyandskaya, 31. E-mail: info@phlogopite-rus.com, тел.: +7 (812) 244–40–05*
*М. А. РИПИНСКИЙ, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65*

В статье представлены результаты исследований влияния магнетитсодержащей добавки FerroSAND® на основные физико-механические и специальные свойства холоднотвердеющих песчано-смоляных смесей, используемых в Alpha-set- и Furan-процессах. По результатам исследований даны рекомендации по рациональному применению добавок FerroSAND® в смесях с фурановыми, карбамидофурановыми и фенолформальдегидными связующими.

Ключевые слова. Песчано-смоляные смеси, физико-механические свойства, специальные добавки, Alpha-set-процесс, Furan-процесс, литейные дефекты.

Для цитирования. Коренюгин, С. В. Влияние добавок на основе магнетита на физико-механические и специальные свойства песчано-смоляных смесей / С. В. Коренюгин, С. Л. Ровин, П. П. Кузенков, М. А. Рипинский // *Литье и металлургия*. 2025. № 1. С. 40–46. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-40-46>.

THE INFLUENCE OF MAGNETITE-BASED ADDITIVES ON THE PHYSICO-MECHANICAL AND SPECIAL PROPERTIES OF SAND-RESIN MIXTURES

*S. V. KORENIUGIN, Belarusian National Technical University,
Belarus, Minsk, 65, Nezavisimosty Ave. E-mail: korenugin@bntu.by, tel.: +375 (017) 293–92–04*
*S. L. ROVIN, Metallurgical Scientific Center, Uzmetkombinat JSC,
Uzbekistan, Bekabad, 1, Sirdaryo str. E-mail: s.rovin@uzbeksteel.uz, tel.: +998 (90) 830–75–05*
*P. P. KUZENKOV, SFR Group of Companies, Russia, St. Petersburg,
Kolpino, 31, Finlyandskaya str. E-mail: info@phlogopite-rus.com, tel.: +7 (812) 244–40–05*
*M. A. RYPINSKI, Belarusian National Technical University,
Belarus, Minsk, 65, Nezavisimosty Ave.*

The article presents the results of studies of the effect of FerroSAND® magnetite-containing additive on the basic physico-mechanical and special properties of cold-hardening sand-resin mixtures used in alpha-set and furan processes. Based on the research results, recommendations are given for the rational use of Ferrosan® additives in mixtures with furan, carbamide-furan and phenol-formaldehyde binders.

Keywords. Sand-resin mixtures, physico-mechanical properties, special additives, alpha-set-process, furan-process, casting defects.

For citation. Koreniugin S. V., Rovin S. L., Kuzenkov P. P., Rypinski M. A. The influence of magnetite-based additives on the physico-mechanical and special properties of sand-resin mixtures. *Foundry production and metallurgy*, 2025, no. 1, pp. 40–46. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-40-46>.

Введение

Образование поверхностных дефектов в отливках, как правило, связано с процессами, протекающими в пограничном слое стержня или формы толщиной до 20–30 мм. Для определения термомеханических свойств формовочных и стержневых смесей в лабораторных условиях температурный интервал

испытаний должен соответствовать условиям прогрева пограничного слоя форм и стержней в процессе заливки и формирования отливки, т. е. составлять порядка 450–1200 °С. Наиболее напряженные условия возникают в тонком поверхностном слое, который прогревается до температур 900–1200 °С. Скорость нагрева этого слоя в зависимости от природы огнеупорного наполнителя, вида сплава и толщины стенки отливки может составлять до 500–3000 °С/мин [1].

Основными факторами, влияющими на возникающие напряжения, являются температуропроводность и деформации нагретой смеси, в свою очередь связанные с полиморфными превращениями, которые сопровождаются изменениями объема наполнителя, и температурными расширениями.

При разработке новых составов формовочных и стержневых смесей с использованием добавок, улучшающих различные технологические свойства (формуемость, сопротивление пригару, податливость, выбиваемость, изменяющих ее теплопроводность и т.п.), не следует забывать о необходимости обеспечивать сохранение требуемого уровня базовых специальных и физико-механических свойств, таких, как газопроницаемость, газотворность, прочность, осыпаемость и др.

В работах [2, 3] было рассмотрено влияние различных добавок, в том числе на основе магнетита, на основные физико-механические и реологические свойства смесей, изготовленных по cold-box-amine-процессу. Однако в современном литейном производстве в зависимости от применяемых технологических процессов и видов сплавов используют различные типы песчано-смоляных смесей.

В индивидуальном, единичном и мелкосерийном производствах наиболее распространенными являются холоднотвердеющие смеси (ХТС) на базе фурановых, карбамидофурановых и фенольных смол в сочетании с формальдегидом и отвердителями разных типов [4].

Формовочные смеси на основе карбамидофурановых и фурановых смол (Furan-процесс) востребованы при литье крупных и тяжелых чугунных отливок, когда необходима повышенная прочность.

Успешную конкуренцию Furan-процессу особенно при изготовлении стального литья составляет Alpha-set-процесс, в котором используются фенолформальдегидное связующее и отвердитель на основе сложных эфиров. Несколько уступая смесям на фурановом связующем по уровню прочности и осыпаемости форм и стержней, смеси, используемые в Alpha-set-процессе, превосходят их по термостойкости и не содержат N, S и P, что обеспечивает более высокое качество поверхности отливок и большую экологическую безопасность процесса. Alpha-set-процесс универсален, т. е. может применяться при производстве как чугунных, так и стальных отливок [1].

В то же время высокая прочность песчано-смоляных смесей, их низкая податливость в отвержденном состоянии и теплопроводность влекут за собой вероятность возникновения внутренних напряжений в теле отливок, форм и стержней и образование дефектов в виде просечек, засоров и трещин. Для предотвращения указанных дефектов, помимо подбора противопригарных красок, сегодня чаще всего используют введение в состав смеси специальных добавок, которые обеспечивают снижение остаточной прочности, повышение податливости смеси, а также повышение ее температуропроводности, что позволяет уменьшить градиент температур по сечению формы и стержня и, таким образом, возникающие в них напряжения [5].

Однако, как ранее было установлено, применение многих из этих добавок может приводить к снижению прочности смеси, повышению ее газотворности и снижению газопроницаемости, иногда эти изменения становятся критическими и вызывают появление новых литейных дефектов. Попытки компенсировать снижение прочности смеси увеличением расхода связующего приводят к повышению себестоимости конечной продукции – отливок, более того, увеличение удельного количества связующего влечет за собой еще больший рост газотворности и снижение газопроницаемости смеси, соответственно повышает вероятность образования газовых дефектов.

Ниже представлены результаты исследования влияния добавки на основе магнетита FerroSAND[®], рекомендуемой для исключения просечек, на важнейшие базовые свойства смесей, используемых в Furan- и Alpha-set-процессах: прочность при растяжении, газопроницаемость, газотворность, осыпаемость, скорость прогрева (температуро- и теплопроводность) и деформацию при высокотемпературном нагреве (склонность к внутренним напряжениям при нагреве).

Методика проведения испытаний

Для испытаний были приготовлены стержневые смеси с использованием кварцевого песка 1K₁O₃025 и магнетитсодержащей добавки FerroSAND[®] с размером частиц 0,1–0,3 мм. Составы исследовавшихся стержневых смесей приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Состав стержневой смеси для Furan-процесса

Кварцевый песок, %	FerroSAND®, %	Смола Furan	Отвердитель
100	0	1,0% от массы наполнителя	40% от массы смолы
97	3		
95	5		
90	10		
85	15		
75	25		

Таблица 2. Состав стержневой смеси для Alpha-set-процесса

Кварцевый песок, %	Магнетитовый песок, %	Смола Alpha-Set	Отвердитель
100	0	1,25% от массы наполнителя	20% от массы смолы
97	3		
95	5		
90	10		
85	15		
75	25		

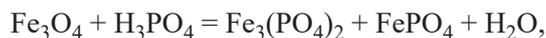
Тепло- и температуропроводность смесей сравнивали по скорости передачи тепла через изготовленный из них плоский стержень толщиной 6,5 мм. Для этого с одной стороны образца устанавливали нагревательный элемент, с другой – термопару, которая фиксировала изменение температуры на поверхности, обратной от нагреваемой стороны. Чтобы уменьшить случайные потери тепла в окружающую среду, всю измерительную ячейку помещали в теплоизолированное пространство. Нагрев продолжали в течение 240 с, при этом показания температуры фиксировали каждые 15 с. Температура нагревательного элемента при проведении испытаний оставалась неизменной и составляла 1000 °С.

Деформацию образцов при высоких температурах измеряли с помощью прибора модели LRu-DMA. Прочность на разрыв, газопроницаемость, газотворность, осыпаемость определяли согласно стандартным методикам в соответствии с ГОСТ 29234.3–91, 23409.7–78, 29234.11–91 и 23409.9–78.

Результаты испытаний

По полученным данным были построены гистограммы и графики (рис. 1–14), которые показывают изменение свойств песчано-смоляных холоднотвердеющих смесей в зависимости от содержания магнетитовой добавки FerroSAND®.

Результаты исследований свидетельствуют, что увеличение содержания магнетита в смеси ведет к снижению прочности образцов (рис. 1, 2). Данная тенденция наиболее заметна в образцах, изготовленных по Furan-процессу, где прочность снижается практически линейно, и при содержании FerroSAND® на уровне 25% прочность образца через 1 сут почти в 3 раза меньше прочности образца из исходной смеси. Это свидетельствует о взаимодействии оксида железа со связующей композицией, в первую очередь с кислотным отвердителем, с образованием фосфатов железа (II и III) по реакции [6]:



что приводит к уменьшению количества отвердителя, участвующего в реакции поликонденсации связующего, снижая скорость отверждения и конечную прочность смеси.

На газопроницаемость песчано-смоляных смесей добавки FerroSAND® оказывают значительно меньшее влияние, что объясняется близостью зернового состава материала и кварцевого песка: газопроницаемость образцов, изготовленных по Alpha-set-процессу, уменьшается ~ на 15% с увеличением количества магнетита в смеси до 25%, а газопроницаемость образцов, изготовленных по Furan-процессу, – менее чем на 5% при таком же количестве добавки (рис. 3, 4).

Из рис. 5, 6 видно, что добавки FerroSAND® очень слабо влияют на изменение газотворной способности смеси – выявленные изменения не превышали 5% от исходного уровня. Учитывая, что FerroSAND® не содержит органических или других соединений, которые могли бы газифицироваться при нагреве, изменение исходной газотворности смеси может быть связано только с остаточной влажностью материала. В данном случае газотворность образцов в значительной степени зависит от используемой связующей композиции.

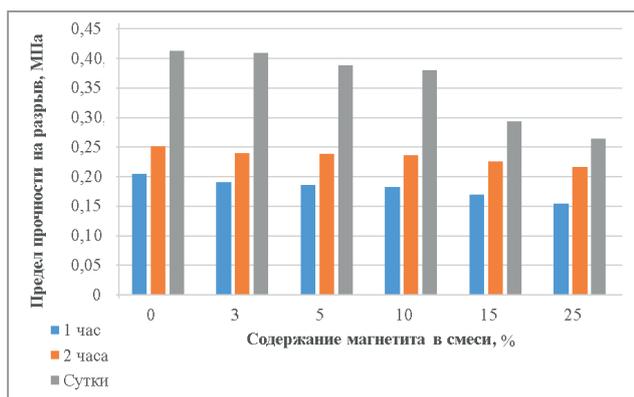


Рис. 1. Результаты прочностных испытаний образцов, изготовленных по Alpha-set-процессу

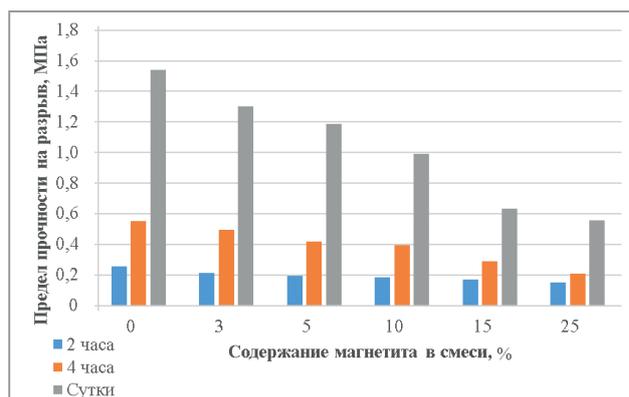


Рис. 2. Результаты прочностных испытаний образцов, изготовленных по Furan-процессу



Рис. 3. Газопроницаемость образцов, изготовленных по Alpha-set-процессу

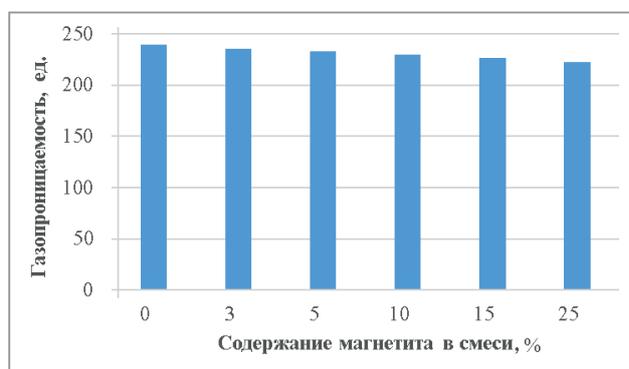


Рис. 4. Газопроницаемость образцов, изготовленных по Furan-процессу

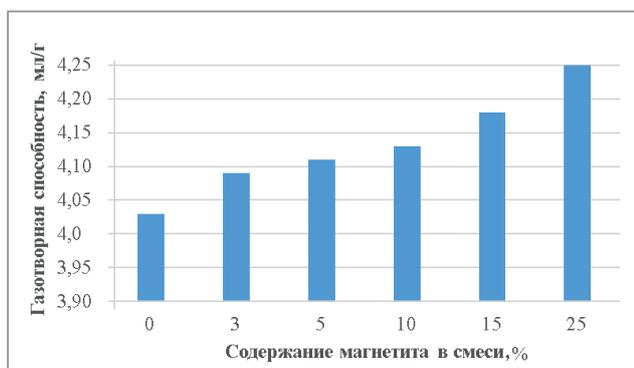


Рис. 5. Газотворность образцов, изготовленных по Alpha-set-процессу

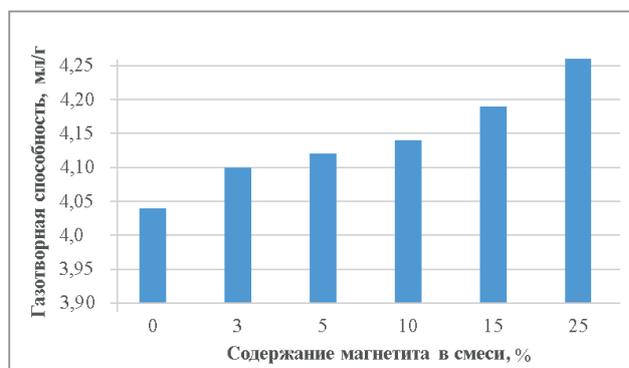


Рис. 6. Газотворность образцов, изготовленных по Furan-процессу

На осыпаемость, так же как на прочность, добавки FerroSAND® оказывают более существенное влияние (рис. 7, 8), особенно на осыпаемость смесей, используемых для Furan-процесса: при добавлении 25% FerroSAND осыпаемость образцов, изготовленных по Alpha-set-процессу, увеличилась ~ в 2,5 раза, а образцов, изготовленных по Furan-процессу, – более чем в 20 раз. Это, так же как в случае с прочностью на разрыв, связано с взаимодействием магнетита с отвердителем, используемым в Furan-процессе.

Исследования деформации при высокотемпературном нагреве показали, что увеличение содержания магнетита ведет к значительному уменьшению деформации: уже при добавлении 10% FerroSAND® деформация снизилась ~ в 1,5 раза, а 25% – почти 2 раза (рис. 9, 10). Это свидетельствует о значительном увеличении теплопроводности смеси и снижении ее теплоемкости. Образец прогревается значительно быстрее, градиент температур по сечению уменьшается и, как следствие, объемные расширения, вызывающие внутренние напряжения и деформации образца, снижаются.

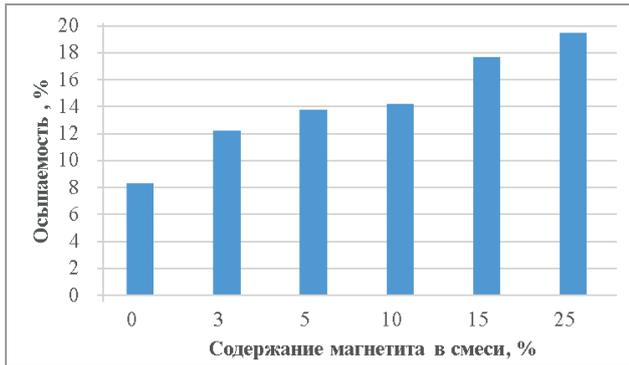


Рис. 7. Осыпаемость образцов, изготовленных по Alpha-set-процессу

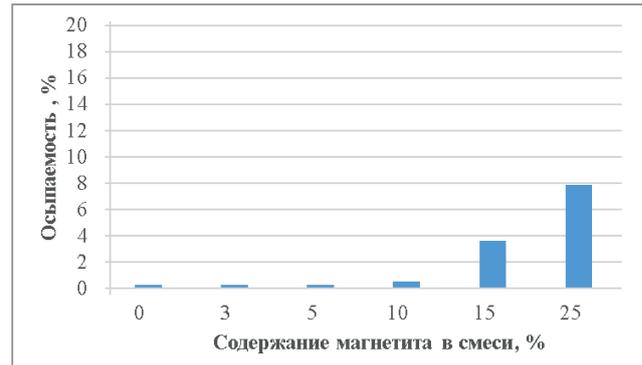


Рис. 8. Осыпаемость образцов, изготовленных по Furan-процессу

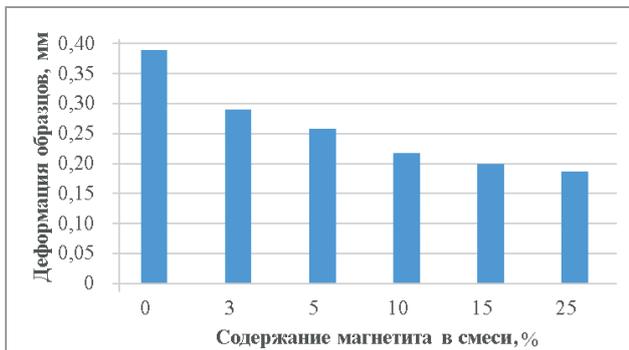


Рис. 9. Высокотемпературная деформация образцов, изготовленных по Alpha-set-процессу

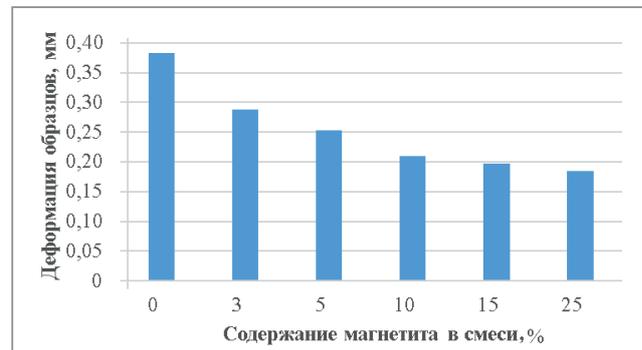


Рис. 10. Высокотемпературная деформация образцов, изготовленных по Furan-процессу

Сказанное подтверждают и графики, отражающие скорость передачи тепла через тело образца. Чем выше содержание добавки FerroSAND® в смеси, тем быстрее передается тепло через образец и тем равномернее прогревается весь его объем. Причем это практически не зависит от используемой связующей композиции (рис. 11, 2). При содержании FerroSAND® в смеси на уровне 25% противоположная сторона образца в процессе нагрева уже через 45 с достигала температуры 150 °С, через 75 с – 215 °С, через 135 с – 250 °С, в то время как образец из смеси без добавки прогревался до 150 °С только через 60 с, до 215 °С – через 135 с, а температуры 250 °С образец из исходной смеси вообще не достиг, так как к этому моменту его деформация превысила критическую величину и образец сломался (рис. 13, 14).

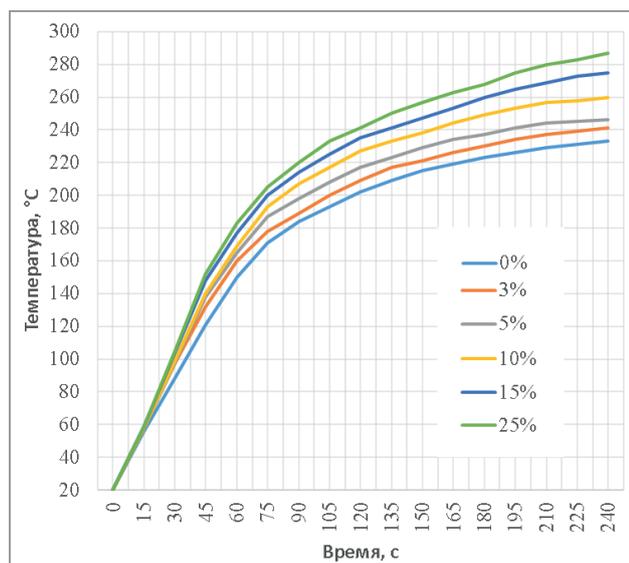


Рис. 11. Графики скорости прогрева образцов, изготовленных по Alpha-set-процессу, в зависимости от содержания добавки FerroSAND®

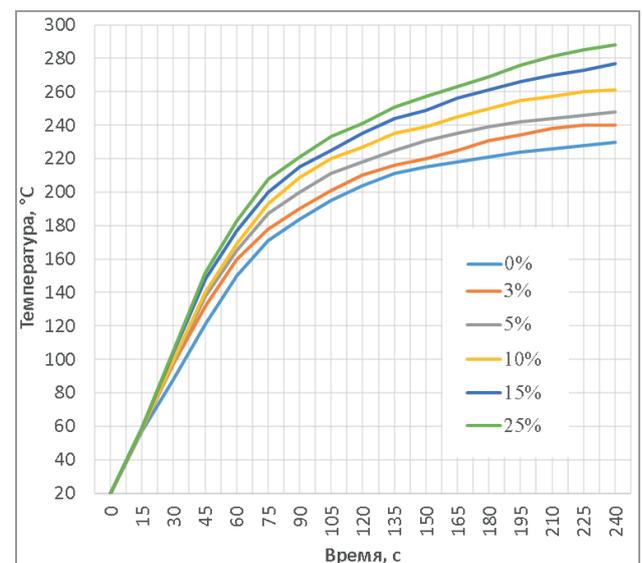


Рис. 12. Графики скорости прогрева образцов, изготовленных по Furan-процессу, в зависимости от содержания добавки FerroSAND®

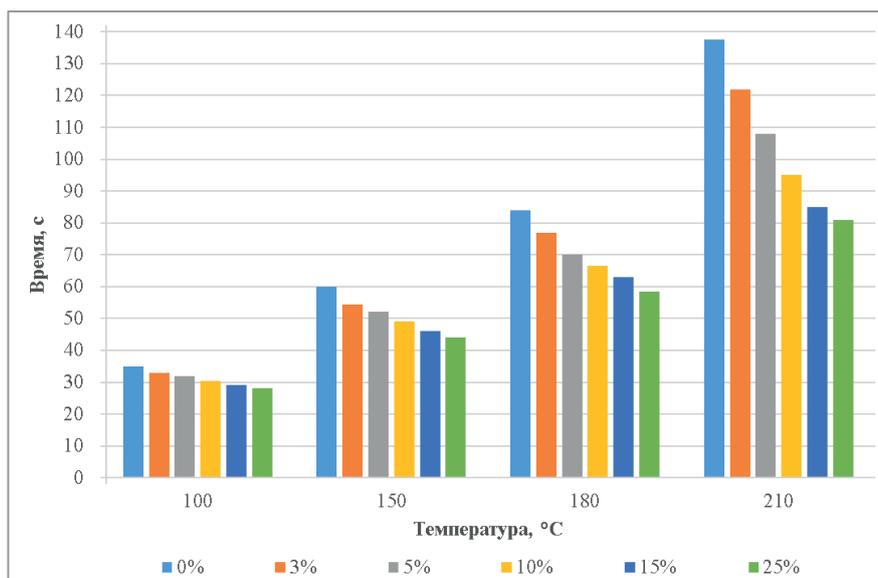


Рис. 13. Время нагрева до температуры 100, 150, 180 и 210°C (Alpha-set-процесс)

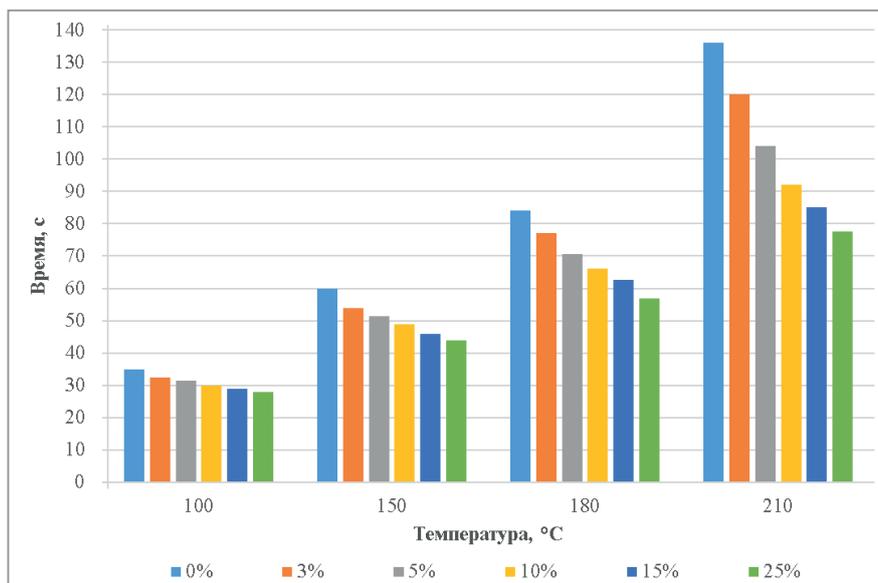


Рис. 14. Время нагрева до температуры 100, 150, 180 и 210°C (Furan-процесс)

Выводы

В результате выполненной работы установлено, что добавление FerroSAND® в количестве до 10% незначительно снижает основные механические свойства ХТС для Furan- и Alpha-set-процессов и не требует увеличения количества связующей композиции. Однако следует отметить, что влияние FerroSAND® более заметно при использовании добавки в смесях для Furan-процесса, что требует более жесткого ограничения и контроля его содержания в этих смесях. В то же время в смесях для Alpha-set-процесса при необходимости содержание добавки может быть увеличено и до 15–20% без существенного снижения прочностных свойств.

Добавки FerroSAND® в количестве 5–10% позволяют значительно увеличить теплопроводность смеси, что, в свою очередь, снижает перепад температуры по сечению формы и стержня и уменьшает интенсивность изгибающих напряжений, возникающих в поверхностных слоях формы и стержня при кристаллизации отливок. Это значительно снижает вероятность образования поверхностных дефектов, таких, как просечки и засоры.

Исходя из полученных результатов, можно дать следующие рекомендации по введению добавки FerroSAND®: в холоднотвердеющие смеси для Furan-процесса – до 5–10%, для Alpha-Set-процесса – до 10–15%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия / А. Н. Болдин [и др.] – М.: Машиностроение, 2006.– 507 с.
2. **Коренюгин, С. В.** Влияние специальных добавок на физико-механические свойства стержневых смесей, используемых для изготовления стержней по Cold-box-amin-процессу / С. В. Коренюгин, С. Л. Ровин // *Литье и металлургия.*– 2023.– № 3.– С. 36–40.
3. **Коренюгин, С. В.** Изменение свойств стержневых смесей по Cold-box-amin-процессу при использовании различных металлосодержащих добавок / С. В. Коренюгин, С. Л. Ровин, П. П. Кузенков // *Литейное производство.*– 2024.– № 6.– С. 21–24.
4. **Жуковский, С. С.** Холоднотвердеющие связующие и смеси для литейных стержней и форм / С. С. Жуковский. – М.: Машиностроение, 2010.– 256 с.
5. **Ровин, С. Л.** Причины возникновения брака отливок по просечкам и поиск способов его предотвращения / С. Л. Ровин, С. В. Коренюгин // *Литейное производство.*– 2019.– № 12.– С. 6–8.
6. **Хенней, Н.** Химия твердого тела / Н. Хенней.– М.: Мир, 1971.–224 с.

REFERENCES

1. **Boldin A.N., Davydov N.I., Zhukovskij S.S. et al.** *Litejnye formovochnye materialy. Formovochnye, stержnevye smesi i pokrytiya* [Foundry molding materials. Molding, core mixtures and coatings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006, 507 p.
2. **Korenyugin S.V., Rovin S.L.** Vliyanie special'nyh dobavok na fiziko-mekhanicheskie svojstva stержnevyyh smesey [The effect of special additives on the physical-mechanical properties of mixtures used for the manufacture of cores by the cold-box-amine-process]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 3, pp.36–40.
3. **Korenyugin S.V., Rovin S.L., Kuzenkov P.P.** Izmenenie svojstv stержnevyyh smesey po Cold-box-amin-processu pri ispol'zovanii razlichnyh metallosoderzhashchih dobavok [Changing the properties of core mixtures by the Cold-box-amine-process using various metal-containing additives]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 2024, no. 6, pp. 21–24.
4. **Zhukovskij S.S.** *Holodnotverdeyushchie svyazuyushchie i smesi dlya litejnyh stержnej i form* [Cold-hardening binders and mixtures for foundry cores and moulds]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010, 256 p.
5. **Rovin S.L., Korenyugin S.V.** Prichiny vozniknoveniya braka otlivok po prosechkam i poisk sposobov ego predotvrashcheniya [Causes of casting defects due to punching and finding ways to prevent them]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 2019, no. 12, pp. 6–8.
6. **Hennej N.** *Himiya tverdogo tela* [Solid state chemistry]. Moscow, MIR Publ., 1971, 224 p.