



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ НА ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЕ

Войтенко В.В., Медведчук С.А., Брешев В.Е., Войтенко Г.О.

Луганский государственный университет им. В. Даля, Луганск, Луганская Народная Республика, Россия

**Аннотация. Постановка задачи.** Представляют интерес технологические возможности применения органического связующего вещества — эпоксидной смолы — при приготовлении стержневой смеси на основе измельченного кварцевого песка, предназначенной для изготовления тонкостенных оболочечных литейных стержней, внутренний объем которых заполнен сухим кварцевым песком без связующего вещества. Актуальность таких исследований объясняется сложностью выбивания крупных и средних песчаных литейных стержней из алюминиевых отливок. Также представляет научный и практический интерес сравнительный анализ физико-технических свойств оболочечных литейных стержней, изготовленных с применением органических и неорганических связующих веществ, и технологических особенностей их изготовления для обоснования выбора стержневой технологии в соответствии с поставленной задачей. **Цель работы.** Проведение экспериментальных исследований физико-технических свойств тонкостенных оболочечных литейных стержней на органическом связующем веществе, внутренний объем которых заполнен сухим кварцевым песком без связующего вещества, а также выполнение сравнительного анализа оболочечных литейных стержней, изготовленных с применением как органических, так и неорганических связующих веществ. **Используемые методы.** Испытания на прочность при растяжении, сжатии и изгибе; испытания на выбиваемость литейных стержней из отливок; испытания на термическую стойкость; Эпокси-процесс; V-процесс. **Новизна.** Предложена и исследована стержневая технология, объединяющая в себе достоинства наиболее перспективных стержневых процессов: Эпокси-процесса и V-процесса. **Результат.** Показана возможность использования тонкостенных оболочечных песчаных литейных стержней, внутренняя полость которых заполнена сухим кварцевым песком без связующего вещества, при литье алюминия и его сплавов, а также выявлены преимущества таких литейных стержней по сравнению с традиционными объемными литейными стержнями. **Практическая значимость.** Приведены результаты экспериментальных исследований физико-технических свойств тонкостенных оболочечных песчаных литейных стержней, внутренняя полость которых заполнена сухим кварцевым песком без связующего вещества, и даны рекомендации по их использованию.

**Ключевые слова:** литейный стержень, оболочка, связующее вещество, стержневая смесь, эпоксидная смола, кварцевый песок, прочность, выбиваемость, термическая стойкость, физико-технические свойства

© Войтенко В.В., Медведчук С.А., Брешев В.Е., Войтенко Г.О., 2026

### Для цитирования

Экспериментальные исследования оболочечных литейных стержней на эпоксидной смоле / Войтенко В.В., Медведчук С.А., Брешев В.Е., Войтенко Г.О. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 32-39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-32-39>



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

## EXPERIMENTAL STUDIES OF SHELL MOLDING CORES BONDED WITH EPOXY RESIN

Voytenko V.V., Medvedchuk S.A., Breshev V.E., Voytenko G.O.

Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk, LPR, Russia

**Abstract. Problem Statement.** The technological feasibility of employing an organic binder such as epoxy resin in the preparation of core molding mixtures based on ground quartz sand is of significant relevance. The proposed mixtures are intended for the manufacture of thin-walled shell molding cores featuring an internal cavity filled with dry, binder-free quartz sand. The relevance of this research is attributed to the complexity of the knocking-out of large and medium-sized sand cores from aluminum castings. A comparative analysis of the physical and technical properties of shell cores bonded with organic and inorganic binders, as well as the technological features of their production is of both scientific and practical interest. This analysis substantiates the selection of core-making technologies in accordance with stated objectives. **Objectives.** The research is aimed at conducting experimental research of the physical and technical properties of thin-walled sand shell molding cores bonded with organic binders and featuring an internal cavity filled with dry, binder-free quartz sand, as well as performing a comparative analysis of shell molding cores bonded with both organic and inorganic binders. **Methods Applied.** The paper contains tests for tensile, compressive, and flexural strength; tests for knocking-out ability of cores from castings; tests for thermal resistance; Epoxy process; V-process. **Originality.** A core-making technology integrating the advantages of the most promising core-making processes such as the Epoxy process and the V-process has been proposed and studied. **Result.** The feasibility of employing thin-walled sand shell molding cores featuring an internal cavity filled with dry, binder-free quartz sand during the casting of aluminum and its alloys has been demonstrated. The advantages of such molding cores compared to conventional solid molding cores have been revealed. **Practical Relevance.** The results of experimental research of the physical and technical properties of thin-walled sand shell molding cores featuring an internal cavity filled with dry, binder-free quartz sand have been presented, accompanied by recommendations for their practical application.

**Keywords:** molding core, shell, binder, core molding mixture, epoxy resin, quartz sand, strength, knocking-out ability, thermal resistance, physical and technical properties

### For citation

Voytenko V.V., Medvedchuk S.A., Breshev V.E., Voytenko G.O. Experimental Studies of Shell Molding Cores Bonded with Epoxy Resin. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 32-39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-32-39>

### Введение

Стержневые процессы являются важной частью современного литейного производства. Заслуженный интерес в мире получили оболочечные стержневые процессы благодаря экономии связующего вещества и легкого удаления кварцевого песка из внутренних полостей отливки, о чем свидетельствуют современные исследования в этом направлении [1, 2]. Наиболее часто используются органические связующие вещества. Применение фенолоформальдегидных и фурановых синтетических смол в качестве связующих веществ в современных стержневых процессах объясняется высокой технологичностью стержневого процесса, хорошей манипуляторной прочностью и отличной выбиваемостью литейных стержней из отливок, изготовленных по Cold-Vox-процессу [3–5]. В ряде случаев в качестве связующих веществ для приготовления стержневых смесей на основе формовочного кварцевого песка применяются эпоксидные смолы, которые также обеспечивают изготовление песчаных литейных стержней с физико-техническими свойствами, схожими со свойствами литейных стержней на фенолоформальдегидных и фурановых синтетических смолах [6, 7]. Немаловажной осо-

бенностью стержневых технологий на органических связующих веществах — синтетических смолах — является высокая производительность стержневого процесса [8, 9]. Песчаные литейные стержни на органических связующих веществах синтетического происхождения могут быть изготовлены практически любой сложности и массы [10]. Что же касается оболочечных песчаных литейных стержней, то качество оболочки песчаного литейного стержня зависит от многих факторов, влияние которых в настоящее время полностью не изучено и требует дополнительных исследований.

Традиционно применяются объемные песчаные литейные стержни, технология изготовления которых наиболее проста. Однако объемные песчаные литейные стержни в процессе использования не всегда в достаточной степени обеспечивают хорошую выбиваемость и достаточную термическую стойкость поверхности к воздействию со стороны металлического расплава. Например, при литье алюминия могут возникнуть сложности с выбиванием из отливок песчаных литейных стержней, имеющих сравнительно большой объем, вследствие неполного термического разложения органического связующего вещества по всему объему литейного стержня. При литье объем-

ных отливок из чугуна и стали термическая стойкость песчано-смоляных литейных стержней может оказаться недостаточной для получения качественных внутренних поверхностей в отливке. Несмотря на неоспоримые достоинства применения органических связующих веществ синтетического происхождения, они имеют ряд недостатков. Стержневой процесс не является полностью безопасным для персонала стержневого участка, поскольку при термическом разложении синтетических смол, используемых в качестве связующих веществ, выделяются жидкие и газообразные токсичные вещества [11, 12].

Применение синтетических смол в качестве связующих веществ, по сравнению с неорганическими связующими веществами, например жидким натриевым стеклом, приводит к меньшей термической стойкости поверхностей песчаных литейных стержней, что необходимо учитывать при литье металлов и сплавов со сравнительно высокими температурами плавления. Еще к одному недостатку стержневого процесса на органических синтетических смолах можно отнести сложность применения оборотной стержневой смеси из-за содержания углерода, что увеличивает экологическую нагрузку на окружающую среду. Кроме того, органические синтетические смолы стоят заметно дороже по сравнению с неорганическими связующими веществами, например жидким натриевым стеклом, что имеет значение при изготовлении песчаных литейных стержней большой массы. Указанные недостатки могут быть частично устранены путем применения оболочечных литейных стержней на синтетических органических связующих веществах с заполнением внутреннего пространства оболочки сухим чистым формовочным кварцевым песком либо оборотной стержневой смесью, без связующего вещества, поэтому исследования в данном направлении представляют собой актуальную научно-техническую задачу.

Целью работы является проведение экспериментальных исследований физико-технических свойств тонкостенных оболочечных литейных стержней на органическом связующем веществе, внутренний объем которых заполнен сухим формовочным кварцевым песком без связующего вещества, а также выполнение сравнительного анализа оболочечных литейных стержней, изготовленных с применением как органических, так и неорганических связующих веществ.

### Материалы и методы исследования

Для улучшения выбиваемости песчаных литейных стержней на органических связующих веществах из алюминиевых отливок проведены экспериментальные исследования, направленные на оценку возможностей технологии изготовления оболочечных песчано-смоляных литейных стержней на органическом связующем веществе — эпоксидной смоле, а также исследованы физико-технические свойства оболочечных литейных стержней с заполнением внутренней полости сухим формовочным кварцевым песком либо оборотной стержневой смесью без свя-

зующего вещества. Для изготовления оболочечных песчаных литейных стержней использован измельченный путем перемалывания формовочный кварцевый песок марки  $2K_1O_3025$  по ГОСТ 2138–91 со средним размером частиц менее 100 мкм. Необходимость измельчения кварцевого песка для изготовления стержневой смеси, из которой изготавливалась оболочка песчаного литейного стержня, обоснована в ходе предварительных проведенных экспериментов по исследованию влияния размеров частиц кварцевого песка на смачиваемость поверхности стержневых ящиков стержневой смесью, изготовленных из различных материалов, таких как резина, силикон, полиэтилен, полипропилен, полистирол и полиэтилентерефталат. В качестве связующего вещества применялась эпоксидно-диановая смола марки ЭД-20 по ГОСТ 10587–84 с жидким отвердителем марки ПЭПА (полиэтиленполиамин) по ТУ 6-02-594-75 при массовом соотношении отвердителя к смоле, равном 1:10. Применение эпоксидной смолы в качестве связующего вещества обусловлено ее несколько меньшей вредностью для здоровья человека и меньшей стоимостью по сравнению с фурановыми смолами.

В ходе предварительных исследований установлено, что стержневые ящики из перечисленных материалов особо хорошо смачиваются стержневой смесью и имеют хорошую адгезию к их внутренней поверхности, когда средний размер частиц формовочного кварцевого песка составляет менее 100 мкм. При использовании эпоксидно-диановой смолы марки ЭД-20 можно кратковременно снизить ее вязкость путем подогрева до 30–40°C, с последующим охлаждением стержневого ящика до 10–20°C после формирования оболочечной формы для повышения вязкости эпоксидной смолы. Если вязкость эпоксидной смолы уменьшена вследствие добавления растворителя в количестве не более 5 мас. %, например метилового спирта либо технического ацетона, то повысить вязкость стержневой смеси можно путем подогрева стержневого ящика, в результате чего растворитель испарится. Однако для улучшения текучести лучше не использовать растворители, поскольку они снижают прочность и термостойкость, а также небезопасны для человека. Наилучшие результаты по улучшению текучести дает применение пластификатора марки ДБФ (дибутилфталат) в количестве до 10 мас. % от массы связующего вещества и отвердителя, что позитивно влияет на увеличение эластичности и прочности оболочечных песчаных литейных стержней. При использовании эпоксидно-диановой смолы марки ЭД-22 по ГОСТ 10587–84 с жидким отвердителем марки ПЭПА управлять вязкостью стержневой смеси удобно путем изменения ее температуры в диапазоне 10–60°C.

В случае изготовления литейных стержней в форме тел вращения либо близкой к ней, хорошие результаты дает вращение со скоростью менее 6 об/мин стержневого ящика для равномерного распределения стержневой смеси до ее первичной полимеризации, при которой она теряет текучесть, что позволяет получить более равномерную по толщине

оболочку литейного стержня. Стержневая смесь, подходящая для изготовления оболочечного литейного стержня, должна обладать при заполнении стержневого ящика достаточной текучестью, поэтому требуется повышенное содержание связующего вещества в ее составе. Это приводит к увеличению прочности оболочки литейного стержня после отверждения (полимеризации связующего вещества). Предварительная полимеризация эпоксидно-диановой смолы при температуре 23–25°C происходит в течение 1–2 ч, в то время как полная полимеризация происходит при такой температуре в течение 48–50 ч. Чтобы увеличить скорость предварительной полимеризации эпоксидно-диановой смолы в стержневой смеси в 2–3 раза, удобно повысить ее температуру до 30–40°C. После того как предварительная полимеризация эпоксидно-диановой смолы в стержневой смеси произошла, можно таким же способом в 8–10 раз повысить скорость полимеризации смолы для достижения манипуляторной прочности оболочечного литейного стержня, для чего можно повысить его температуру в стержневом ящике до 40°C и более.

Для испытаний на прочность оболочечных песчаных литейных стержней использовались образцы специальной формы и машина для испытаний на прочность при растяжении, сжатии и изгибе. Для определения степени коробления оболочечного песчаного литейного стержня использовалась методика, основанная на сравнении изображений литейного стержня, полученных в одинаковом масштабе, до и после термического воздействия. Термическая стойкость оболочечного литейного стержня определялась по времени его нахождения при температуре испытаний до момента начала разрушения литейного стержня (момента начала осыпания его поверхности).

Для сравнения результатов исследований физико-технических свойств оболочечных песчано-смоляных литейных стержней на органическом связующем веществе — эпоксидной смоле — с результатами испытаний песчано-жидкостекольных литейных стержней использовались аналогичные стержневые ящики и измельченный кварцевый песок аналогичного помола. Заполнение оболочечных песчаных литейных стержней чистым кварцевым песком без связующего вещества осуществлялось после затвердевания оболочки и набора требуемой манипуляторной прочности. После заполнения оболочечных песчаных литейных стержней чистым кварцевым песком они запечатывались стержневой смесью, состав которой аналогичен составу смеси, примененной для изготовления оболочки литейного стержня. В процессе проведения серии экспериментов средняя толщина оболочки литейного стержня варьировалась в диапазоне от 1 до 10 мм.

### Полученные результаты и их обсуждение

В результате экспериментальных исследований возможностей технологии изготовления оболочечных песчано-смоляных литейных стержней на органическом связующем веществе — эпоксидной смоле, а

также их физико-технических свойств было установлено следующее. Для изготовления оболочечных литейных стержней могут быть применены стержневые ящики, изготовленные либо покрытые следующими материалами: силикон; резина; полиэтилен; полипропилен; полистирол; ПЭТ (полиэтилентерефталат). Силикон и резина, благодаря пластичности, оказывают минимальное силовое воздействие при извлечении из стержневого ящика оболочечного литейного стержня. Полиэтилен, полипропилен, полистирол и ПЭТ могут быть применены для тонкостенных стержневых ящиков, которые могут быть изготовлены методами экструзии на термопластавтоматах либо путем штамповки в пластическом состоянии. Недостатками этих материалов, с точки зрения применения для изготовления стержневых ящиков, являются их удовлетворительные адгезия и смачиваемость стержневыми смесями на органических и особенно на неорганических связующих веществах. Однако использование формовочного кварцевого песка мелкого помола позволяет повысить вязкость таких стержневых смесей и улучшить адгезию и смачиваемость материала стержневого ящика.

Установлено, что в зависимости от используемого материала стержневого ящика, а также от формы и сложности изготавливаемого оболочечного литейного стержня, стержневая смесь должна обладать определенной текучестью для получения качественной оболочки толщиной от 3 до 10 мм. Литейные стержни с такой толщиной оболочки имеют малые деформации при термическом воздействии. При толщине от 1 до 3 мм оболочка может испытывать сильную деформацию, особенно при неравномерном нагреве ее поверхности. Наполнение из чистого формовочного кварцевого песка препятствует деформации оболочки литейного стержня за счет отвода поступающей от оболочки теплоты в глубь литейного стержня, а также за счет создаваемой дополнительной жесткости объема.

Термическая стойкость экспериментальных образцов песчано-смоляных литейных стержней зависит от массовой доли органического связующего вещества — эпоксидно-диановой смолы марки ЭД-20, что показано на **рис. 1**.

Установлено, что для заполнения оболочечного песчано-смоляного литейного стержня может быть использован как чистый формовочный кварцевый песок, так и обратная стержневая смесь, полученная путем измельчения и переработки выбитых из отливок литейных стержней. Такая возможность является достоинством технологии изготовления оболочечных литейных стержней по сравнению с технологией получения объемных литейных стержней, где традиционно используется чистый формовочный кварцевый песок для приготовления стержневой смеси.

На **рис. 2** и **3** показаны диаграммы разрушения образцов песчано-смоляных литейных стержней с различной массовой долей эпоксидно-диановой смолы марки ЭД-20.



Рис. 1. Экспериментальные образцы песчано-смоляных литейных стержней после термической обработки при различных массовых долях органического связующего вещества – эпоксидно-диановой смолы марки ЭД-20: 1 – 1,5 мас. %; 2 – 2,0 мас. %; 3 – 3,0 мас. %

Fig. 1. Experimental samples of sand-resin cores after heat treatment at different mass fractions of the organic binder such as ED-20 grade epoxy-diane resin: 1 is 1.5 wt %; 2 is 2.0 wt %; 3 is 3.0 wt %

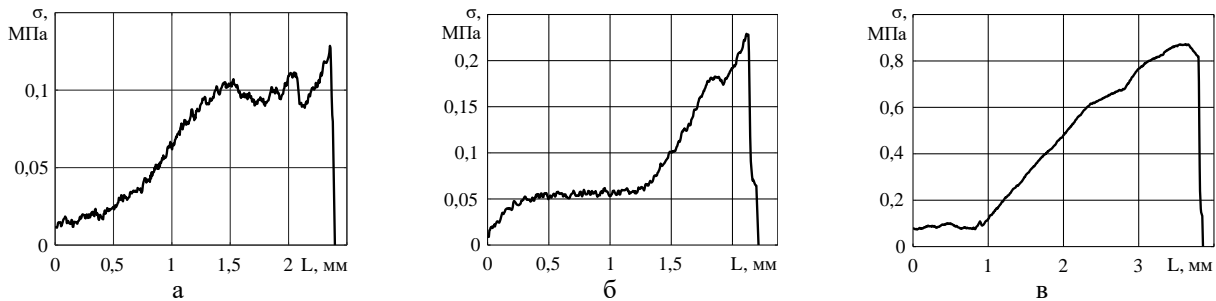


Рис. 2. Диаграммы разрушения при растяжении экспериментальных образцов песчано-смоляных литейных стержней с различными массовыми долями органического связующего вещества в стержневых смесях: а – 1,5 мас. %; б – 2,0 мас. %; в – 3,0 мас. %

Fig. 2. Tensile fracture diagrams of experimental sand-resin cores samples with different mass fractions of the organic binder in core molding mixtures: а is 1.5 wt %; б is 2.0 wt %; в is 3.0 wt %

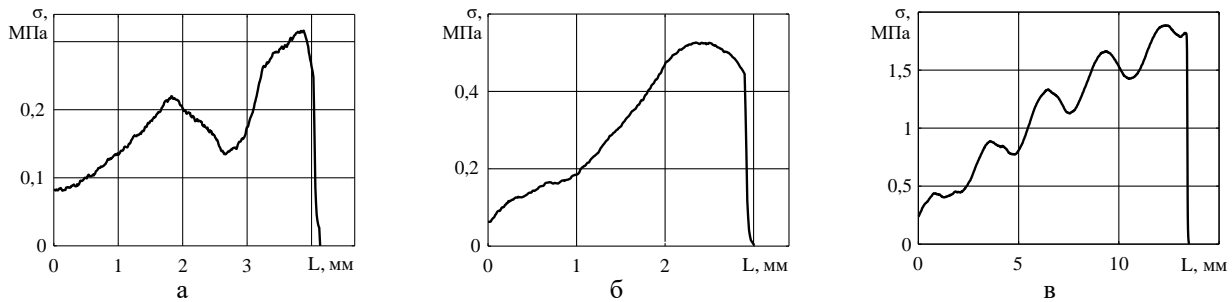


Рис. 3. Диаграммы разрушения при сжатии экспериментальных образцов песчано-смоляных литейных стержней с различными массовыми долями органического связующего вещества в стержневых смесях: а – 1,5 мас. %; б – 2,0 мас. %; в – 3,0 мас. %

Fig. 3. Compressive fracture diagrams of experimental sand-resin cores samples with different mass fractions of the organic binder in core molding mixtures: а is 1.5 wt %; б is 2.0 wt %; в is 3.0 wt %

На диаграммах используются следующие обозначения:  $\sigma$  – механическое напряжение в образце литейного стержня, МПа;  $L$  – линейное перемещение привода машины для испытаний материалов на прочность (не соответствует реальному удлинению образца из-за хрупкого разрушения его опорных поверхностей), мм.

Добавление, даже в небольших количествах, менее

10 мас. %, обратной стержневой смеси при изготовлении песчано-смоляных литейных стержней резко снижает их предел прочности в 2–5 раз при растяжении, сжатии и изгибе вследствие содержания углерода, образованного при термическом разложении органического связующего вещества, причем чем больше массовая доля углерода в стержневой смеси, тем более заметно снижается прочность литейного стержня.

Сравнение физико-технических свойств оболочечных песчано-смоляных литейных стержней на органическом связующем веществе – эпоксидной смоле – и оболочечных песчано-жидкостекольных литейных стержней показывает, что пределы прочности при растяжении, сжатии и изгибе могут быть в 1,6–3,8 раза больше у литейных стержней на органическом связующем веществе, что зависит от массовой доли связующего вещества в стержневой смеси. Однако песчано-жидкостекольные литейные стержни обладают значительно большей термической стойкостью, до десяти раз, и меньшим короблением оболочки, до четырех раз, при одинаковой форме литейных стержней и одинаковой толщине их оболочек. Заполнение оборотной стержневой смесью либо формовочным кварцевым песком в обоих случаях позитивно влияет на термическую стойкость оболочечных литейных стержней и уменьшает до двух раз деформацию при термическом воздействии по сравнению с незаполненными литейными стержнями. Выбиваемость оболочечного песчано-смоляного литейного стержня на органическом связующем веществе – эпоксидной смоле – отличная, в то время как выбиваемость оболочечного песчано-жидкостекольного литейного стержня хорошая и может быть улучшена путем погружения отливки в резервуар с водой. При этом массовая доля эпоксидной смолы может находиться в диапазоне 1,5–3,0 мас. %, а массовая доля жидкого натриевого стекла – в диапазоне 6,0–12,0 мас. % при его плотности 1,42 г/см<sup>3</sup>. При использовании жидкого натриевого стекла другого состава и другой плотности его массовая доля может отличаться. Для улучшения выбиваемости в песчано-жидкостекольную стержневую смесь может быть добавлена измельченная морская ракушка в количестве 5–20 мас. %. Результаты испытаний на пределы прочности экспериментальных образцов песчаных литейных стержней на органическом и неорганическом связующем веществе при растяжении, сжатии и изгибе, а также результаты испытаний на выбиваемость из отливок с использованием пятибалльной шкалы выбиваемости приведены в **таблице**.

Оболочечные песчано-жидкостекольные литейные стержни лучше подходят для изготовления массивных отливок из металлов и металлических сплавов с высокими температурами заливки, в то время как оболочечные песчано-смоляные литейные стержни лучше подходят для литья цветных металлов и их сплавов ввиду меньшей термической стойкости. При термическом разложении связующего вещества в

оболочке песчано-смоляного литейного стержня на органическом связующем веществе – эпоксидной смоле – образуются вредные для здоровья человека и окружающей среды токсичные продукты разложения, в то время как термическое разложение оболочечного песчано-жидкостекольного литейного стержня является безопасным и экологичным. Также следует отметить, что эпоксидно-диановые смолы содержат эпихлоргидрин, который, согласно ГОСТ 12.1.007–76, относится ко II классу опасности по степени вредного воздействия на организм человека. Кроме того, такие смолы могут содержать органический растворитель толуол, который, в соответствии с тем же ГОСТом, относится к III классу опасности. Это обуславливает необходимость строгого соблюдения требований техники безопасности, включая применение средств индивидуальной защиты и организацию вентиляции стержневого участка.

### Заключение

Несмотря на широкое применение в мире фурановых смол в качестве связующего вещества при изготовлении оболочечных песчаных литейных стержней, содержание в фурановых смолах формальдегида, оказывающего важное влияние на физико-технические свойства песчаных литейных стержней, ухудшает условия труда в литейном цехе, так как формальдегид имеет резкий запах и вреден для здоровья человека. Поэтому применение эпоксидных смол в качестве связующего вещества при изготовлении оболочечных песчаных литейных стержней является менее вредной для рабочих литейного цеха альтернативой. Оболочечные песчаные литейные стержни обладают лучшими условиями для их извлечения из отливок по сравнению с традиционными объемными песчаными литейными стержнями, что достигается за счет того, что внутренняя полость оболочки оболочечного песчаного литейного стержня заполнена формовочным кварцевым песком без связующего вещества. Такая оболочка в процессе термического разложения связующего вещества разрушается и кварцевый песок покидает внутреннюю полость оболочки вместе с остатками самой оболочки. Таким образом, при изготовлении небольших отливок из алюминиевых литейных сплавов не возникает ситуации, когда объемные песчаные литейные стержни не полностью разрушаются из-за термического разложения связующего вещества.

Таблица. Значения пределов прочности при растяжении, сжатии и изгибе, а также выбиваемости экспериментальных образцов песчано-смоляных литейных стержней на органическом связующем веществе — эпоксидно-диановой смоле марки ЭД-20

Table. Values of tensile, compressive, and flexural strength, as well as knocking-out ability of experimental sand-resin cores samples bound with the organic binder such as ED-20 grade epoxy-diane resin

Доля связующего вещества, мас. %	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности при изгибе, МПа	Выбиваемость, балл
1,5	0,132	0,335	0,496	1
2,0	0,269	0,589	1,042	1
3,0	0,882	1,898	1,227	2

Проведенные экспериментальные исследования возможностей технологии изготовления оболочечных песчано-смоляных литейных стержней на органическом связующем веществе — эпоксидной смоле, а также сравнительный анализ физико-технических свойств таких стержней со свойствами оболочечных песчано-жидкостекольных литейных стержней показали перспективность применения исследуемой технологии в литейном производстве. Оболочечные песчано-жидкостекольные литейные стержни менее технологичны в изготовлении, чем песчано-смоляные оболочечные литейные стержни, что объясняется более длительным временем набора прочности. Несмотря на это, оболочечные песчано-жидкостекольные литейные стержни, внутренняя полость оболочки которых заполнена формовочным кварцевым песком без связующего вещества, могут найти применение при изготовлении отливок из чугуна и стали, так как связующее вещество – жидкое стекло – обладает более высокой термостойкостью, возрастающей при увеличении его массовой доли в стержневой смеси, чем органические связующие вещества. К тому же жидкое стекло при термическом разложении не выделяет токсичных и вредных для здоровья человека веществ, что позволяет улучшить условия труда в литейном цехе и на стержневом участке.

Сформированные рекомендации позволяют обоснованно выбирать материал стержневого ящика, толщину оболочки литейного стержня, а также средний размер частиц формовочного кварцевого песка, что обеспечивает необходимое качество поверхности литейного стержня, манипуляторную и окончательную прочность, термическую стойкость и отличную выбиваемость литейных стержней из отливок цветных и черных металлов и сплавов. Полученные результаты будут способствовать дальнейшему развитию и совершенствованию стержневых процессов в литейном производстве.

#### Список источников

1. Iron and Steel Castings and Core Production Results from Finer Grades of Chromite Sand in Shell Applications / Steele R., Kerns K., LaFay P., and LaFay V. // *International Journal of Metalcasting*. 2025, vol. 19, pp. 635–642. DOI: 10.1007/s40962-024-01311-x.
2. Innovative Inorganic Binder Systems for the Production of Cores for Non-Ferrous Metal Alloys Reflecting the Product Quality Requirements / Merta V., Beňo J., Obzina T., Radkovský F., Kroupová I., Lichý P., Folta M., Janovská K., Nguyenová I., and Dostál M. // *Metals*. 2021, vol. 11, article 733. DOI: 10.3390/met11050733.
3. Управление свойствами стержневых смесей, изготовленных по Cold-box-amine-процессу / С.А. Куликов, Ф.И. Рудницкий, В.А. Шумигой, Ю.А. Куликов // *Литье и металлургия*. 2024. № 3. С. 51–56. DOI: 10.21122/1683-6065-2024-3-51-56.
4. Коренюгин С.В., Ровин С.Л. Влияние специальных добавок на физико-механические свойства смесей, используемых для изготовления стержней по cold-box-amine-процессу // *Литье и металлургия*. 2023. № 3. С. 36–40. DOI: 10.21122/1683-6065-2023-3-36-40.
5. Elimination of Casting Defects Induced by Cold Box Cores / Udayan N., Srinivasan M. V., Vaira Vignesh R., and Govindaraju M. // *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 46, part 10, pp. 5022–5026. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.398.
6. Саначева Г.С., Вострикова Н.М., Дубова И.В. Органические связующие в литейном производстве // *Журнал Сибирского федерального университета. Сер.: Техника и технологии*. 2012. № 5 (7). С. 799–804. URL: <http://journal.sfu-kras.ru/article/9541> (дата обращения: 09.07.2025).
7. Environmental Impact of the Reclaimed Sand Addition to Molding Sand with Furan and Phenol-Formaldehyde Resin – A Comparison / Holtzer M., Daňko R., Kmita A., Drożyński D., Kubecki M., Skrzyński M., and Rocznik A. // *Materials*. 2020, vol. 13 (19), article 4395. DOI: 10.3390/ma13194395.
8. Banganayi F.C., Nyembwe D.K., and Polzin H. Optimisation of an Environmentally Friendly Foundry Inorganic Binder Core Making Process for the Replacement of an Organic Binder // *MRS Advances*. 2020, vol. 5, pp. 1323–1330. DOI: 10.1557/adv.2020.225.
9. Fortini A., Merlin M., and Raminella G. A Comparative Analysis on Organic and Inorganic Core Binders for a Gravity Diecasting Al Alloy Component // *International Journal of Metalcasting*. 2022, vol. 16, pp. 674–688. DOI: 10.1007/s40962-021-00628-1.
10. Characteristic of Core Manufacturing Process with Use of Sand, Bonded by Ecological Friendly Nonorganic Binders / Fedoryszyn A., Daňko J., Daňko R., Aslanowicz M., Fulko T., and Ościłowski A. // *Archives of Foundry Engineering*. 2013, vol. 13 (3), pp. 19–24. DOI: 10.2478/afe-2013-0052.
11. Development of Inorganic Binder Systems to Minimise Emissions in Ferrous Foundries / Daňko R., Kmita A., Holtzer M., Daňko J., Lehms D., and Tapola S. // *Sustainable Materials and Technologies*. 2023, vol. 37, article e00666. DOI: 10.1016/j.susmat.2023.e00666.
12. Eco-Friendly Inorganic Binders: A Key Alternative for Reducing Harmful Emissions in Molding and Core-Making Technologies / Kmita A., Daňko R., Holtzer M., Daňko J., Drożyński D., Skrzyński M., Rocznik A., Gruszka D. R., Jakubski J., and Tapola S. // *International Journal of Molecular Sciences*. 2024, vol. 25 (10), article 5496. DOI: 10.3390/ijms25105496.

#### References

1. Steele R., Kerns K., LaFay P., and LaFay V. Iron and Steel Castings and Core Production Results from Finer Grades of Chromite Sand in Shell Applications. *International Journal of Metalcasting*. 2025;19:635-642. DOI: 10.1007/s40962-024-01311-x.
2. Merta V., Beňo J., Obzina T., Radkovský F., Kroupová I., Lichý P., Folta M., Janovská K., Nguyenová I., & Dostál M. Innovative Inorganic Binder Systems for the Production of Cores for Non-Ferrous Metal Alloys Reflecting the Product Quality Requirements. *Metals*. 2021;11:733. DOI: 10.3390/met11050733.
3. Kulikov S.A., Rudnitskiy F.I., Shumigay V.A., Kulikov Yu.A. Control of the properties of core mixtures produced

- by the cold-box-amine process. *Litio i metallurgiya* [Casting and Metallurgy]. 2024;(3):51-56. (In Russ.) DOI: 10.21122/1683-6065-2024-3-51-56.
4. Korenyugin S.V., Rovin S.L. Influence of special additives on the physical and mechanical properties of mixtures used for core making by the cold-box-amine process. *Litio i metallurgiya* [Casting and Metallurgy]. 2023;(3):36-40. (In Russ.) DOI: 10.21122/1683-6065-2023-3-36-40.
  5. Udayan N., Srinivasan M. V., Vaira Vignesh R., and Govindaraju M. Elimination of Casting Defects Induced by Cold Box Cores. *Materials Today: Proceedings*. 2021;46(10):5022-5026. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.398.
  6. Sanacheva G.S., Vostrikova N.M., Dubova I.V. Organic binders in foundry production. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Ser.: Tekhnika i tekhnologii* [Journal of the Siberian Federal University. Series: Engineering and Technologies]. 2012;(5(7)):799-804. URL: <http://journal.sfu-kras.ru/article/9541> (Accessed July 9, 2025). (In Russ.)
  7. Holtzer M., Dańko R., Kmita A., Drożyński D., Kubecki M., Skrzyński M., and Roczniak A. Environmental Impact of the Reclaimed Sand Addition to Molding Sand with Furan and Phenol-Formaldehyde Resin - A Comparison. *Materials*. 2020;13(19). Article 4395. DOI: 10.3390/ma13194395.
  8. Banganayi F. C., Nyembwe D. K., and Polzin H. Optimisation of an Environmentally Friendly Foundry Inorganic Binder Core Making Process for the Replacement of an Organic Binder. *MRS Advances*. 2020;5:1323-1330. DOI: 10.1557/adv.2020.225.
  9. Fortini A., Merlin M., and Raminella G. A Comparative Analysis on Organic and Inorganic Core Binders for a Gravity Diecasting Al Alloy Component. *International Journal of Metalcasting*. 2022;16:674-688. DOI: 10.1007/s40962-021-00628-1.
  10. Fedoryszyn A., Dańko J., Dańko R., Aslanowicz M., Fulko T., and Ościłowski A. Characteristic of Core Manufacturing Process with Use of Sand, Bonded by Ecological Friendly Nonorganic Binders. *Archives of Foundry Engineering*. 2013;13(3):19-24. DOI: 10.2478/afe-2013-0052.
  11. Dańko R., Kmita A., Holtzer M., Dańko J., Lehms D., and Tapola S. Development of Inorganic Binder Systems to Minimise Emissions in Ferrous Foundries. *Sustainable Materials and Technologies*. 2023;37. Article e00666. DOI: 10.1016/j.susmat.2023.e00666.
  12. Kmita A., Dańko R., Holtzer M., Dańko J., Drożyński D., Skrzyński M., Roczniak A., Gruszka D. R., Jakubski J., and Tapola S. Eco-Friendly Inorganic Binders: A Key Alternative for Reducing Harmful Emissions in Molding and Core-Making Technologies. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024;25(10). Article 5496. DOI: 10.3390/ijms25105496.

Поступила 24.07.2025; принята к публикации 19.01.2026; опубликована 31.03.2026  
Submitted 24/07/2025; revised 19/01/2026; published 31/03/2026

**Войтенко Валерий Владимирович** – ассистент кафедры микро- и нанoeлектроники, Луганский государственный университет им. В. Даля, Луганск, Луганская Народная Республика, Россия.  
Email: valery.voytenko@outlook.com. ORCID 0009-0004-0267-5068.

**Медведчук Сергей Адамович** – старший преподаватель кафедры цифровых технологий и машин в литейном производстве, Луганский государственный университет им. В. Даля, Луганск, Луганская Народная Республика, Россия.  
Email: lguni.lit@yandex.ru.

**Брешев Владимир Евгеньевич** – доктор технических наук, заведующий кафедрой станков, инструментов и инженерной графики, Луганский государственный университет им. В. Даля, Луганск, Луганская Народная Республика, Россия.  
Email: stankiinstrumentygraf@mail.ru.

**Войтенко Галина Олеговна** – кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники, Луганский государственный университет им. В. Даля, Луганск, Луганская Народная Республика, Россия.  
Email: galinamicroel@mail.ru.

**Valery V. Voytenko** – Assistant Lecturer at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk, Lugansk People's Republic, Russia.  
Email: valery.voytenko@outlook.com. ORCID 0009-0004-0267-5068.

**Sergey A. Medvedchuk** – Senior Lecturer at the Department of Digital Technologies and Machinery in Foundry Production, Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk, Lugansk People's Republic, Russia.  
Email: lguni.lit@yandex.ru.

**Vladimir E. Breshev** – DrSc (Eng.), Head of the Department of Machinery, Tools, and Engineering Graphics, Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk, Lugansk People's Republic, Russia.  
Email: stankiinstrumentygraf@mail.ru.

**Galina O. Voytenko** – PhD (Eng.), Associate Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk, Lugansk People's Republic, Russia.  
Email: galinamicroel@mail.ru.