

УДК 621.742

С.А. Яшина¹, Т.Д. Клюквина¹

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ОСЫПАЕМОСТИ САМОТВЕРДЕЮЩИХ СМЕСЕЙ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-110-118

Рассмотрено применение самотвердеющих смесей при изготовлении песчаных форм для производства отливок. Приведены данные о применении различных формовочных смесей в мировом литейном производстве. Рассмотрены различные группы смол, преимущества и недостатки смесей на этих смолах. Показаны факторы, влияющие на осыпаемость формовочной смеси. Анализируются дефекты отливок, вызванные повышенной осыпаемостью литейной формы. Приводятся оптимальные значения осыпаемости, необходимые для получения качественных форм.

Ключевые слова: литье в песчаные формы, самотвердеющие смеси, осыпаемость, дефекты отливок, поверхностная прочность литейной формы, связующее.

S.A. Yashina¹, T.D. Klyukvina¹

THE STUDY OF THE MECHANISM OF SELF-HARDENING MIXTURES FRIABILITY (review)

In this work using of self-hardening mixtures to manufacture castings is studied. The information about appliance of different sand mixtures in the world foundry industry is given. Different kinds of resins, advantages and disadvantages of mixtures made with these resins are discussed. Affecting on friability factors are studied. Casting defects caused by increased friability of the mold are analyzed. Optimal values of friability necessary to obtain qualitative forms are given.

Keywords: sand casting, self-hardening mixtures, friability, casting defects, surface strength of mould, binder.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Литейное производство – одна из наиболее широко используемых для получения заготовок отраслей промышленности. В различных областях производства доля изделий, полученных с помощью литья, составляет от 30 до 90% [1]. Анализ статистических данных в журнале Modern Casting свидетельствует о том, что в 2016 г. мировой объем выпуска отливок составил 104,4 млн тонн и по сравнению с предыдущим годом практически не изменился [2]. На рис. 1 показана динамика роста объемов производства отливок, начиная со второй половины XX века.

Общее снижение объемов производства отливок связано с уменьшением металлоемкости промышленной продукции из-за развития менее металлоемких отраслей промышленности, улучшения свойств литого металла, повышения объема выпуска отливок из сплавов с меньшей плотностью и т. д.

Разработка новых материалов и сплавов влечет за собой образование новых и совершенствование давно известных технологических процессов производства литых заготовок и деталей.

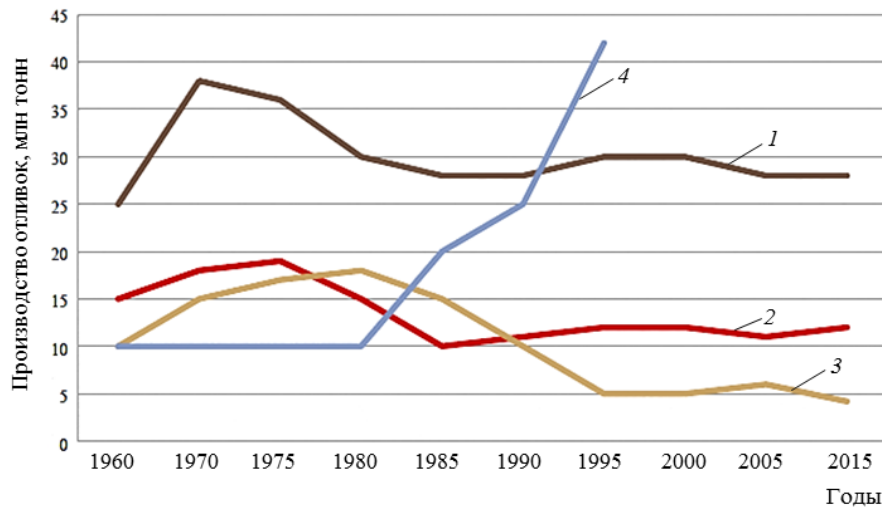


Рис. 1. Динамика роста объемов производства отливок в странах «большой шестерки» (1), США (2), России (3) и Китае (4)

В отечественной промышленности ~70% отливок изготавливают с помощью литья в песчаные формы [3]. Этот процесс получил наибольшее распространение благодаря простоте используемого оборудования, универсальности материала отливок, возможности получения отливок различной конфигурации, доступности применяемых исходных материалов и т. д. Однако отливки, полученные литьем в песчаные формы, имеют низкую точность и обладают шероховатой поверхностью, в большинстве случаев требуется применение механической обработки.

Доля различных процессов в общей структуре производства отливок в США в 2016 г. (по данным журнала Modern Casting [4]) показана на рис. 2. Согласно этим данным, значительную долю (21%) занимает производство отливок с помощью песчаных форм, изготовленных из самотвердеющих смесей.

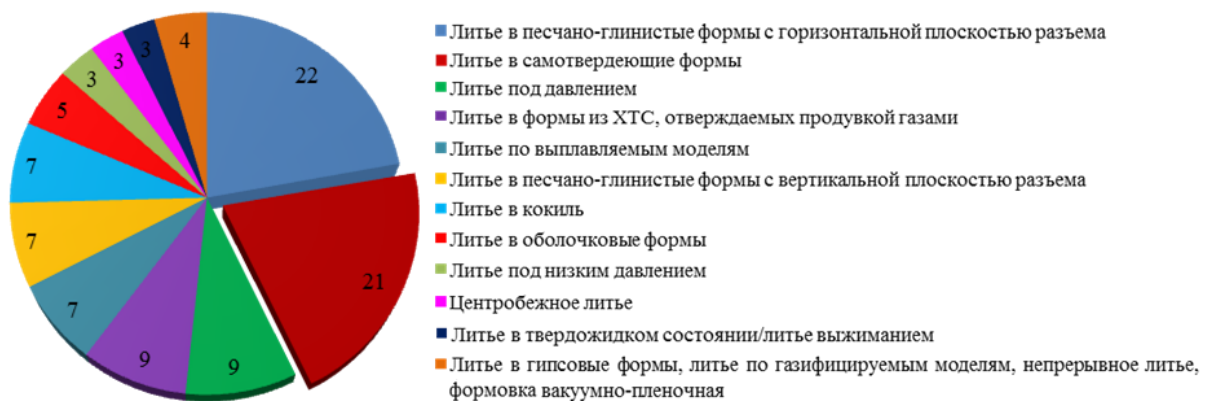


Рис. 2. Доля применения (%) различных процессов производства отливок в США (2016 г.)

Стержни для отливок изготавливают по различным технологическим процессам. Согласно анализу данных, в США по состоянию на 2016 г. доля отливок, отлитых в самотвердеющие песчаные формы, составляет >23%. Объем применения смесей, отверждаемых продувкой, на треть меньше. В таблице показаны преимущества и недостатки самотвердеющих смесей и смесей, отверждение которых происходит в результате продувки газами.

Сравнение самотвердеющих смесей и смесей, отверждаемых продувкой

Тип отверждения	Преимущества	Недостатки
Самотвердеющие смеси	<ol style="list-style-type: none"> 1. Отсутствие необходимости применения дорогостоящих машин и оснастки. 2. Высокая прочность стержней. 3. Высокая размерная точность стержней. 4. Минимальные затраты электроэнергии (отверждение происходит при комнатной температуре без дополнительного оборудования). 5. Легкая выбиваемость в большинстве случаев) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Малая живучесть смеси. 2. Токсичность используемых связующих (кроме жидкого стекла)
Смеси, отверждаемые продувкой газами	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокая прочность стержней. 2. Высокая размерная точность стержней. 3. Выбиваемость легче по сравнению с самотвердеющими смесями 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Необходимость использования дорогостоящего оборудования для продувки. 2. Токсичность используемых связующих

Сравнение этих процессов дополнительно подтверждает, что самотвердеющие смеси – это наиболее перспективная технология изготовления форм и стержней при производстве литых заготовок.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии изготовления деформированных полуфабрикатов и фасонных отливок из магниевых и алюминиевых сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [5–7].

Материалы, используемые в технологии самотвердеющих смесей

С помощью процессов, основанных на применении отверждаемых в холодной оснастке смесей, могут быть получены различные по конфигурации литые заготовки практически из любых сплавов. Эти процессы соответствуют различным требованиям по типу производства и качеству получаемых изделий (размерной точности отливок, шероховатости поверхности, влиянию на экологию) и т. д. [8, 9].

Рассмотрим общие преимущества процессов *no-bake*, т. е. процессов изготовления форм с применением смесей, отверждаемых в холодной оснастке [10]:

- универсальность при изготовлении отливок различной конфигурации практически из любых сплавов;
- простота регулирования свойств изготавливаемых форм и стержней;
- доступность смол и катализаторов;
- возможность применения несложного смесеприготовительного и формовочного оборудования в составе механизированных участков и линий;
- относительно легкая выбиваемость смеси из отливок.

Самотвердеющая песчаная композиция включает наполнитель (в большинстве случаев это кварцевый песок, так как он является наиболее доступным и позволяет получать отливки практически из всех сплавов), связующее и катализатор.

Связующие вещества, применяемые в процессе формовки с использованием холоднотвердеющих смесей (ХТС), могут быть органическими, т. е. принадлежать к семейству смол, или неорганическими – т. е. на основе силикатов натрия [8].

Наиболее широко используемыми связующими веществами в ХТС являются смолы [9]. Смолы, которые применяют в технологиях *no-bake*, делятся на:

смолы кислотного процесса формовки с использованием ХТС

- фенольные смолы типа резола;
- фурановые смолы без азота или с азотом;
- фенол-фурановые смолы без азота или с азотом;

смолы щелочного процесса формовки с использованием ХТС

- фенольная смола типа резола с высоким содержанием гидрата щелочи;
смолы с уретановой связью
- фенольные смолы типа дибензилового эфира в различных ароматических растворителях.

Каждый тип смолы, используемый в процессах *no-bake*, обладает своими преимуществами, недостатками и особенностями работы с ним. Рассмотрим подробно каждый из упомянутых видов смол.

Фурановые, фенольные и фенол-фурановые смолы

Первая группа смол наиболее широко используется в процессе изготовления форм из ХТС. Основными составляющими смолы в данном случае являются фурфуроловый спирт, фенол и их смеси [11].

Фурановая смола – продукт полимеризации фурфуролового спирта, легко перемешивается с наполнителем и равномерно обволакивает его частицы. Кроме того, смесь обладает прекрасной текучестью [11], низким содержанием химически реактивной воды, хорошо сохраняет механические свойства, прекрасно поддается механической регенерации.

Фенольная смола получается в результате полиуплотнения фенола формальдегидом [11], обладает высокими теплостойкостью и механическими свойствами, ее стоимость ниже, чем фурановой смолы.

Отверждение этих смол определяется главным образом колебаниями температуры, для них трудно контролировать время схватывания. Из-за воздействия воздуха на форму поверхность формы схватывается намного быстрее, чем внутренние части. Фенольные смолы гигроскопичны, поэтому расширение смеси может привести к поверхностным трещинам.

Фенол-фурановые смолы сочетают свойства каждого компонента. Реакция полимеризации при воздействии мочевины и добавлении силана способствует выбивке смеси из формы [11].

Щелочные фенольные смолы

Отверждение смеси, основой которой является щелочная фенольная смола, наступает в результате химической реакции сложного эфира и щелочного резола, которые являются основными. Резол – продукт первоначального отверждения, состоящий из изомеров и/или других веществ [12].

Основные смолы меньше подвержены взаимодействию с песком щелочной или кислотной природы, в сравнении со смолами, которые катализируются с использованием кислот. Реакция происходит без использования катализатора, поэтому продолжительность отверждения зависит не от количества отвердителя, а от его качества.

Отверждение завершается только при заливке формы металлом, т. е. песчаная форма термопластична [12].

Применение щелочных смол дает следующие преимущества:

- очищение смесителей требует меньших усилий;

- меньше риск образования поверхностных трещин на форме;
- высокая эрозионная стойкость в связи с термопластичностью песчаной формы;
- при заливке не выделяются азот и сера, что уменьшает возможность возникновения дефектов в стальных и чугунных отливках.

Изоцианат-уретановые смолы

Отверждение смеси на основе этой группы смол наступает в ходе реакции полиизоцианатов с полибензилфениловым эфиром (резолом). В качестве катализатора используют пиридин или амин.

Применение отверждаемой в холодной оснастке смеси на основе изоцианат-уретановой смолы имеет следующие преимущества [13]:

- быстрое отверждение по всему объему формы;
- устойчивость к воздействию теплоты;
- форма хорошо выбивается;
- смесь устойчива к влажности, изменению температур, кислотности песка.

Для повышения текучести смеси рекомендуется применять вибростол.

С учетом вышеприведенных сведений о составе и свойствах компонентов смесей необходимо понимать их взаимосвязь при работе со смоляными смесями, отвержденными в холодной оснастке; контролировать свойства компонентов смесей; варьировать состав смеси, чтобы добиться необходимых показателей.

Дефекты отливок при применении форм из самотвердеющих смесей

При нарушении рецептуры, неверном распределении компонентов смеси, несоблюдении условий формовки в отливках, полученных формовкой с применением ХТС, могут возникнуть различные дефекты.

Несоблюдение сроков *живучести* (максимального времени для использования готовой смеси [12]) приводит к очень низкой текучести смеси и чрезмерному снижению механической прочности полученной формы или стержня.

Живучесть смеси зависит от применяемых компонентов, температуры и влажности в помещении, где осуществляется процесс формовки, наличия контакта смеси с окружающей средой при хранении [12].

Следует разграничивать понятия живучести и *времени снятия*, за которое смесь достигает манипуляторной прочности.

Разница между временем живучести и временем снятия должна быть как можно больше, она зависит от типа смолы, типа и количества катализатора, качества и температуры песка [12].

Газовые дефекты отливок, полученных в процессе формовки с использованием технологий *no-bake*, имеют следующее происхождение [12]:

- азотная пористость;
- водородная пористость;
- пористость вследствие совместного воздействия азота и водорода;
- газовые раковины.

Азот может образовываться из смолы, добавленной к песку последней, или из ее скоплений в регенерированном песке. Кроме того, он может образовываться в результате металлургических процессов.

Наличие пригара на поверхности отливок определяется неверным гранулометрическим составом песка, недостаточным уплотнением смеси и несоблюдением срока ее живучести.

При недостаточной термостойкости и низкой пластичности связующего могут образовываться заливки, так как в результате расширения песка при воздействии

высоких температур на поверхности формы возникают трещины. Эти свойства смолы ухудшаются по мере ее старения.

При повышенной жесткости формы затрудненная усадка вызывает образование горячих трещин в отливках. Эту проблему можно решить, уменьшая количество связующего или применяя менее теплоустойчивые связующие.

Недостаточная *прочность* литейных форм и стержней может быть причиной «подутости» отливки, прорыва металла, ужимин, нарушений точности размеров [14]. На рис. 3 показаны примеры дефектов, возникших из-за повышенной осыпаемости литейной формы.

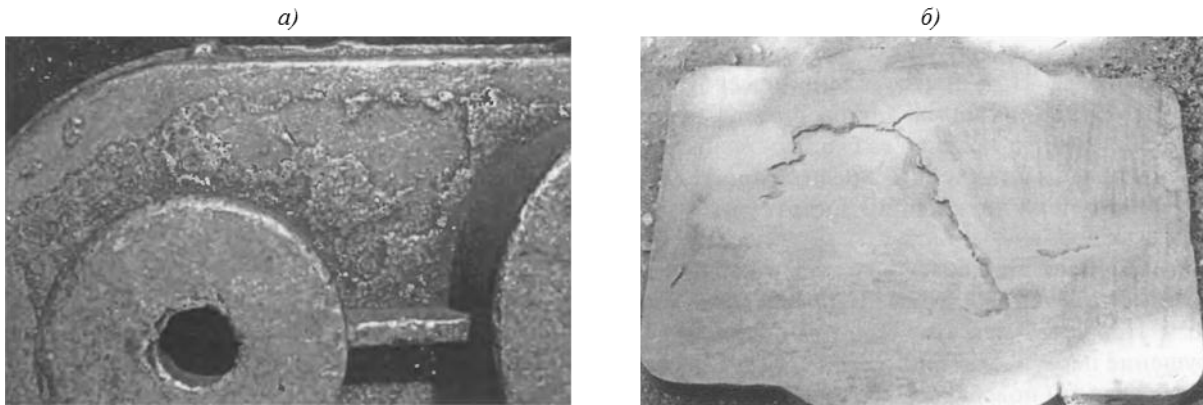


Рис. 3. Дефекты отливок – пригар (а) и ужимина (б)

Прочность определяется числом контактов между зернами наполнителя и индивидуальной прочностью связи между зернами наполнителя в зоне этих контактов. На прочность формовочной смеси влияет множество факторов [15], которые представлены на схеме (рис. 4).



Рис. 4. Факторы, влияющие на прочность смеси

Рассмотрение дефектов, возникающих в отливках при формовке с применением технологий *no-bake*, выявление их причин дополнительно подтверждает важность контроля свойств смесей.

Осыпаемость как свойство, влияющее на качество отливки

Осыпаемость – технологическое свойство формовочных смесей, характеризующее их поверхностную прочность. Согласно работе [12], осыпаемость – это склонность поверхностного слоя смеси к разрушению при истирании.

Поверхность песчаной формы или стержня находится в особых условиях, так как количество контактов наполнителя, от которого зависит прочность смеси, меньше, чем у зерен наполнителя внутри смеси (рис. 5) [16, 17].

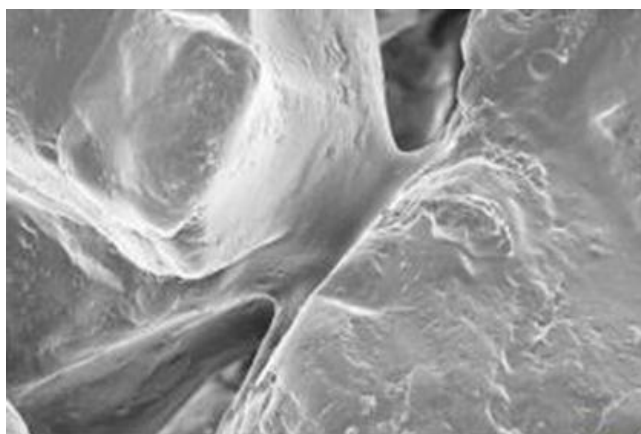


Рис. 5. «Мостик» связующего между двумя соседними зернами наполнителя

Механизм образования прочности может быть адгезионным (между связующим и наполнителем) и когезионным (по пленке связующего). Для самотвердеющих смесей характерно смешанное разрушение с преобладанием адгезионного. В предыдущем разделе данной работы описаны факторы, оказывающие влияние на прочность конечного продукта.

В дополнение к описанным ранее факторам известно, что осыпаемость также зависит от гигроскопичности связующего и времени, по истечении которого смесь обладает достаточной прочностью для заливки металла и получения качественной отливки [1].

В случае использования гигроскопичных связующих с накоплением влаги в поверхностном слое снижается прочность, а осыпаемость значительно увеличивается.

Причиной повышенных значений осыпаемости самотвердеющих смесей может служить то, что применяемая смесь частично потеряла живучесть. В условиях производства для стабильной работы осыпаемость смеси не должна превышать 0,1–0,2% [12]. Очевидно, что осыпаемость – важная характеристика смесей, значение которой зависит от состава смеси, ее компонентов и других характеристик, таких как влажность, гигроскопичность, живучесть. Для стабильности технологии необходимо контролировать свойства компонентов смеси, характеристики условий работы с ними, понимать взаимосвязь между изменением состава и свойств.

При работе с конкретными компонентами важна информация о том, как влияет изменение концентрации компонентов смеси на ее свойства.

Заключения

В данной работе рассмотрено, какую долю в литейной промышленности занимают отливки, произведенные с помощью технологии изготовления смесей, отверждаемых в холодной оснастке. Выявлено, что самотвердеющие смеси являются наиболее перспективными для получения литых заготовок методом литья в песчаные формы [18].

Каждый вид самотвердеющих смесей обладает своими преимуществами, недостатками и особенностями, которые необходимо учитывать при работе с ними [19].

При нарушении рецептуры, неверном распределении компонентов смеси, несоблюдении условий формовки в отливках, формы для отливки которых изготавливали из ХТС, могут возникнуть различные дефекты [20, 21].

Осыпаемость – одно из основных свойств литейной формы, влияющих на качество отливок, характеризует свойство поверхностного слоя формовочной смеси разрушаться при воздействии трения.

Осыпаемость зависит от состава смеси, соотношения компонентов, влажности, гигроскопичности и живучести, поэтому целью дальнейших исследований будет поиск оптимального процентного соотношения компонентов для нескольких типов смесей. Поиск и анализ оптимального состава смесей будет производиться на основе отечественных материалов с целью дальнейшего внедрения процесса на российских заводах, использующих технологию формовки с применением самотвердеющих смесей [22].

ЛИТЕРАТУРА

1. Кукуй Д.М., Скворцов В.А., Андрианов Н.В. Теория и технология литейного производства: учебник в 2 ч. Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2013. Ч. 1: Формовочные материалы и смеси. 384 с.
2. Global Casting Production Growth Salls // Modern Casting Journal. December, 2017. P. 25–28. URL: <https://www.moderncasting.com/issues/december-2017> (дата обращения: 15.05.2018).
3. Леонов А.А., Дуюнова В.А., Ступак Е.В., Трофимов Н.В. Литье магниевых сплавов в разовые формы, полученные новыми методами // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №12. Ст. 01. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 28.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-1-1.
4. The U.S. Portreit By the Nummers // Modern Casting Journal. January, 2016. P. 35–38. URL: <https://www.moderncasting.com/issues/january-2016> (дата обращения: 15.05.2018).
5. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
6. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
7. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбил. науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
8. Жуковский С.С. Холоднотвердеющие связующие и смеси для литейных стержней и форм: справочник. М.: Машиностроение, 2010. 256 с.
9. Технологические процессы и оборудование для модернизации производства в машиностроении (формы, стержни): сборник руководящих технических материалов. М.: Металлург, 2009. 289 с.
10. Дуюнова В.А., Мухина И.Ю., Уридия З.П. Новые противопопригарные присадочные материалы для литейных форм магниевых отливок // Литейное производство. 2009. №9. С. 18–21.
11. Галанте Г. Формовка с применением ХТС. Наш взгляд. Италия: IMF Луино, 1997. Ч. 2. 343 с.
12. Галанте Г. Формовка с применением ХТС. Наш взгляд. Италия: IMF Луино, 1997. Ч. 1. 161 с.

13. Клюквина Т.Д., Власова К.А., Леонов А.А., Яшина С.А. Изучение механизма образования прочности в самотвердеющих смесях с фенольным связующим (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №3. Ст. 03. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 28.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-3.
14. Технология литейного производства: Формовочные и стержневые смеси / под ред. С.С. Жуковского, А.Н. Болдина, А.И. Яковлева и др. Брянск: Изд-во БГТУ, 2003. 470 с.
15. Жуковский С.С. Прочность литейной формы. М.: Машиностроение, 1989. 288 с.
16. Khandewal H., Ravi B. Effect of molding parameters on chemically bonded sand mold properties // Journal of Manufacturing Processes. 2016. Vol. 22. P. 127–133. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612516300093> (дата обращения: 15.05.2018).
17. Болдин А.Н., Давыдов Н.И., Жуковский С.С. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия: справочник. М.: Машиностроение, 2006. 507 с.
18. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
19. Кафтанников А.С., Нуралиев Ф.А., Степашкин Ю.А. Свойства жидкостекольных ХТС с пониженным содержанием связующего // Литейное производство. 2015. №1. С. 31–33.
20. Дуюнова В.А., Волкова Е.Ф., Уридия З.П., Трапезников А.В. Динамика развития магниевых и литейных алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 225–241. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-225-241.
21. Дуюнова В.А., Козлов И.А. Холоднотвердеющие формовочные смеси: перспективы использования при литье магниевых сплавов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2011. №1. С. 41–43.
22. Волкова Е.Ф. Анализ и итоги Международной конференции «Магний-21. Новые горизонты» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2016. №1 (40). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-86-94.