И. О. Леушин, А. Н. Грачев, Л. И. Леушина, А. И. Марков

**К ВОПРОСУ О РОЛИ ВОДЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ
И СТЕРЖНЕЙ РАЗОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

**Нижегородский государственный технический университет
им. Р. Е. Алексеева (федеральный опорный университет),
г. Нижний Новгород**

e-mail: igoleu@yandex.ru, alexgra76@mail.ru,
kafmto@mail.ru, skixmai@yandex.ru

Производство разовых литейных форм и стержней по-прежнему актуально и не потеряет своей практической значимости в обозримом будущем. В подавляющем большинстве случаев технологии производства разовых форм и стержней предполагают работу со смесями, содержащими воду. В этой связи роль влаги в составе формовочных и стержневых смесей трудно переоценить. Среди ее основных функций – придание материалу при его загрузке в рабочую полость технологической оснастки пластичности, текучести, формемости, живучести. Вода принимает участие практически во всех процессах физической и химической природы, протекающих в литейных формах и стержнях, как на этапах их изготовления, так и во время применения. Однако для обеспечения необходимых характеристик литейных формы или стержня и далее качества литья содержание воды в составе материала формы или стержня должно меняться на различных этапах технологического процесса их изготовления. По этой причине перед производителями встает ряд вопросов, связанных не столько с определением оптимального количественного диапазона содержания воды в материале литейной формы или стержня, сколько с механизмами удержания и методами удаления воды и выбором приемов их практической реализации для повышения управляемости процесса. Именно эта проблема находится в центре внимания в данной статье.

Ключевые слова: вода, влага, литейная форма, литейный стержень, формовочная смесь, стержневая смесь, механизмы удержания воды, методы удаления воды, отверждение формы или стержня.

I. O. Leushin, A. N. Grachev, L. I. Leushina, A. I. Markov

**TO THE QUESTION ABOUT THE ROLE OF WATER IN THE PRODUCTION
OF CASTING FORMS AND RING ONE-TIME APPLICATION**

**Nizhniy Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev
(Nizhniy Novgorod, Russia)**

The production of single casting molds and cores is still relevant and will not lose its practical significance in the foreseeable future. In the vast majority of cases, the technology for the production of single molds and cores involves working with mixtures containing water. In this regard, the role of moisture in the composition of molding and core mixtures is difficult to overestimate. Among its main functions is to impart plasticity, fluidity, formability, and survivability to the material when it is loaded into the working cavity of the technological tooling. Water takes part in almost all processes of a physical and chemical nature occurring in foundry molds and cores, both at the stages of their manufacture and during application. However, to ensure the necessary characteristics of the casting mold or core and further casting quality, the water content in the composition of the mold or core should change at various stages of the manufacturing process. For this reason, manufacturers are faced with a number of issues related not so much to determining the optimal quantitative range of water content in the material of the mold or core, but to retention mechanisms and methods for removing water and the choice of methods for their practical implementation to increase the controllability of the process. This problem is the focus of attention in this article.

Keywords: water, moisture, mold, foundry core, molding sand, core mixture, water retention mechanisms, water removal methods, curing of the mold or core.

Литейные формы и стержни разового применения на сегодняшний день по-прежнему востребованы производством и, по оценкам специалистов-литейщиков, не потеряют своей значимости в обозримом будущем [1]. В качестве материалов для их изготовления используют формовочные и стержневые смеси, в состав которых традиционно входят огнеупорный наполнитель, связующее и технологические добавки. Свойствами этих смесей во многом определяются технологические варианты и возможности практической реализации производства литейных форм и стержней и, как следствие, качество получаемого литья.

Известны несколько десятков технологий производства литейных форм и стержней, отличающиеся друг от друга видом наполнителя, связующего, технологических добавок, приемами и методами уплотнения смеси, а также внешнего воздействия на нее для придания необходимой геометрии и требуемого уровня характеристик формы или стержня [2–3]. В подавляющем большинстве случаев эти технологии предполагают работу со смесями, содержащими воду, которая может находиться в них в различных агрегатных состояниях (твердое – лед; жидкое, газообразное – водяной пар).

По мнению ряда исследователей [4–8], вода в составе формовочных и стержневых смесей выполняет сразу несколько функций, в том числе придание материалу при загрузке его в рабочую полость технологической оснастки пластичности, текучести, формовости, живучести. Обладая высоким значением поверхностного натяжения, она является хорошим свя-

зующим материалом, при нормальных условиях обволакивая зерна наполнителя и обеспечивая прочность смеси в сыром состоянии. Вода, находящаяся в составе смеси, при низких температурах замерзает, что позволяет достичь высокой прочности формы или стержня. В условиях высоких температур вода превращается в пар, который выходя из тела литейной формы или стержня, оставляет в них своеобразный каркас, способствующий удержанию формой или стержнем геометрии, соответствующей отпечатку изделия в оснастке. Вода принимает участие практически во всех процессах физической и химической природы, протекающих в литейных формах и стержнях, как на этапах их изготовления, так и во время применения.

При этом известно, что для обеспечения необходимых характеристик литейных форм или стержня и далее качества литья содержание воды в составе материала формы или стержня должно меняться на различных этапах технологического процесса их изготовления. Так, например, недостаток воды может привести к высокой осыпаемости формы или стержня, а ее избыток – к вскипу формы и повышению газотворности стержня при их контакте с металлическим расплавом, что неминуемо создаст условия для образования соответствующих дефектов отливки.

По этой причине перед производителями встает ряд вопросов, связанных не столько с определением оптимального количественного диапазона содержания воды в материале литейной формы или стержня (многие предприятия эту задачу решают опытным путем), сколь-

ко с механизмами удержания и методами удаления воды и выбором приемов их практической реализации для повышения управляемости процесса.

Именно эта проблема лежит в центре внимания авторов данной статьи.

Рассмотрим более детально механизмы удержания и удаления воды применительно к влажным формовочным и стержневым смесям, которые принято относить к классу структурно-сложных коллоидных капиллярно-пористых систем.

Механизмы удержания воды в смеси

В формовочных и стержневых смесях вода может удерживаться их компонентами химически, физически, физико-химически либо быть не связанной с ними и находиться в свободном состоянии.

Вода, входящая в состав минералов смесей, делится на гидратную (конституционную и кристаллизационную) и цеолитную. Конституционная и кристаллизационная вода химически связана с минералами смеси, связь цеолитной воды с ними носит физико-химический характер [9].

Конституционная влага имеет наиболее прочную связь с минералами наполнителя смеси, поскольку находится с ними в точном молекулярном соотношении химического соединения (например, в каолините $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$). Эта вода выделяется при определенной температуре, после чего в минерале происходят необратимые физико-химические изменения: свойства минерала резко изменяются и не восстанавливаются при последующем увлажнении.

Кристаллизационная влага тоже входит в состав минералов смеси, но менее прочно связана с их кристаллической решеткой и выделяется при более низких температурах. Ее количество переменное, зависит от условий выделения конкретного химического соединения из раствора. В формуле такого соединения (кристаллогидрат) кристаллизационную влагу обозначают $n\text{H}_2\text{O}$. При нагреве кристаллизационная влага удаляется из смеси поэтапно и при более низких температурах, чем конституционная, но при намокании смеси она может возвращаться в состав минерала, придавая ему исходные свойства.

Цеолитная влага входит в структуру молекул минерала, но не участвует в построении его кристаллической решетки, а просто «впитывается» в нее (внутрикристаллическое набухание). Удаление такой влаги – обратимый процесс.

Влага, связанная с минералами смеси, но не входящая в их состав, располагается на поверхности зерен наполнителя смеси и в промежутках между ними. Она образует несколько слоев.

Особое значение для обеспечения требуемых характеристик литейных форм и стержней имеет так называемая адсорбированная (пленочная) влага, находящаяся вблизи поверхности зерен смеси, которая удерживается на поверхности зерен силами Ван-дер-Ваальса, имеющими электростатическое происхождение.

Такая вода делится на гигроскопическую (прочно связанную) и осмотическую (рыхло связанную) с минералами смеси. Соответственно принято различать физическую и физико-химическую адсорбцию влаги в материале литейной формы или стержня.

Твердые частицы наполнителя во влажной смеси заряжаются отрицательно, покрываясь гидроксильными группами OH^- . За счет водородных связей полярной молекулы вода взаимодействует с этими группами, образуя гидратный слой. При этом между частицами минерала и диполями воды возникают силы взаимодействия, достигающие у поверхности частиц значений в сотни МПа. Эти силы быстро убывают с удалением от поверхности зерна смеси, приближаясь к нулю на расстоянии между частицами 0,5 мкм. Удерживаемый этими силами тонкий слой прочно связанной влаги отличается по своим свойствам от свободной влаги. Такая «жесткая» или «нежидкая» влага имеет большую вязкость, плотность, упругость и более низкую температуру замерзания. Различия в физических свойствах гигроскопической и свободной влаги объясняются наличием значительных электростатических сил притяжения диполей воды к ионам на поверхности твердых частиц. Наблюдается строгая ориентация диполей воды, что затрудняет их движение по сравнению с движением молекул свободной влаги.

К слою этой влаги примыкает слой рыхло связанной влаги, которая может легко отрываться от частицы минерала и по своим физическим свойствам приближается к обычной капельно-жидкой воде.

Свободная влага подразделяется на капиллярную и гравитационную.

Капиллярная влага располагается в кольцеобразных контактах стыков зерен (манжетах) на поверхности зерен. Она не стекает из смеси под действием силы тяжести. Капиллярная влага стягивает частицы наполнителя друг с дру-

гом за счет сил капиллярного давления, усиливая прочность смеси во влажном состоянии.

Гравитационная влага располагается в порах смеси. Она разделяет зерна и стекает под действием собственного веса (силы тяжести). В формовочных и стержневых смесях такая влага, как правило, отсутствует.

Преобладающий вид связи влаги с компонентами формовочной или стержневой смеси определяет выбор наиболее эффективного метода удаления воды для конкретного способа изготовления литейной формы или стержня.

Методы удаления воды из смеси

Анализ известных способов изготовления литейных форм и стержней [10–13], проведенный авторами данной статьи, позволил сделать однозначный вывод о том, что в подавляющем большинстве случаев для формирования литейной формы или стержня с требуемым уровнем их геометрической точности и технологических характеристик требуется удаление влаги (дегидратация). На практике это чаще всего реализуют такими методами, как нагрев, в том числе токами высокой и сверхвысокой частоты, продувка сухим воздухом или другим газообразным сорбентом, вакуумирование (вакуумная экстракция), а также химическая дегидратация.

Термическая дегидратация состоит в испарении под воздействием поступающего тепла части влаги, первоначально содержащейся в капиллярно-пористом влажном слое смеси, и удалении образующихся паров. При этом на процесс парообразования затрачивается значительное количество теплоты, получаемой материалом либо от газообразного сушильного агента (конвективная сушка), либо от горячей поверхности (контактная сушка или инфракрасная сушка), либо за счет выделения теплоты диэлектрических потерь (высокочастотная сушка) [14].

Химическая дегидратация основана на способности некоторых веществ связывать кристаллизационную воду и вновь ее терять при воздействии внешних факторов. Такие вещества способны образовывать кристаллогидраты, связывая молекулы воды, при условии, что в их кристаллической решетке катионы имеют более прочную связь с аквакомплексами, чем с анионами в кристалле безводного вещества.

При этом выбор того или иного метода дегидратации принципиально не влияет на механизм отверждения литейной формы или стержня – вне зависимости от сделанного выбора ме-

ханизм отверждения остается одинаковым, меняться могут только скорость его протекания и соответственно длительность. Наоборот, физическая, химическая или физико-химическая природа процесса отверждения литейной формы или стержня диктует необходимость выбора того или иного метода дегидратации.

Еще одна особенность применения методов дегидратации заключается в том, что они почти всегда малоэффективны по отдельности из-за повышенных энергозатрат (например, на сушку нагретым воздухом), необходимости применения специального оборудования (например, для проведения глубокой вакуумной экстракции) и недостаточной управляемости.

Так, при нагреве основное количество влаги теряется в интервале температур от 90 до 250 °С, а практически полная потеря происходит при достижении порога в 650 °С, но время, необходимое для достижения этого результата, может варьироваться в интервале от нескольких десятков секунд до нескольких суток.

Сушка вакуумом (вакуумирование, или вакуумная экстракция) влажной смеси хотя и позволяет удалить большую часть воды, но протекает медленно и сопровождается эндотермическим эффектом, снижающим скорость отверждения смеси. При глубоком вакуумировании вода из смеси перед испарением замерзает, что ведет к разупрочнению литейной формы или стержня.

При сушке формы или стержня нагретым воздухом из смеси выделяется водяной пар, который движется вместе с воздухом во внутренние слои формы или стержня. При этом скорость подвода воздуха и его движения по объему формы или стержня замедляется из-за повышения давления при испарении влаги и уменьшения газопроницаемости смеси из-за конденсации паров воды в удаленных от фронта подвода воздуха слоях формы или стержня. В результате процесс отверждения смеси за счет действия нагретого воздуха замедляется. При этом сконденсированная влага во внутренних слоях формы или стержня разжижает связующее и по этой причине снижает скорость его отверждения. Вместе с тем связующее, разжиженное водой, под действием движущегося потока воздуха мигрирует во внутренние слои формы (стержня), что ведет к нежелательной неравномерности прочности смеси по ее (его) сечению в направлении движения теплового фронта. Это ухудшает служебные свойства

формы или стержня: поверхностная прочность уменьшается, осыпаемость увеличивается, прочность внутренних слоев увеличивается, что ухудшает выбиваемость смеси из отливок.

Для снижения представленного негативного эффекта, по мнению авторов данной статьи, целесообразно использовать комбинированные методы дегидратации, например, продувка формовочной или стержневой смеси, загруженной в рабочую полость технологической оснастки, газом-сорбентом с последующей подсушкой; продувка смеси сжатым нагретым воздухом с одновременным или последовательным вакуумированием; вакуумная экстракция смеси с последующей ее обработкой сорбентом; вакуумная сушка; сублимационная сушка; нагрев форм или стержней с их последующим вывешиванием на воздухе и т. п.

На практике сделать выбор в пользу какой-либо определенной комбинации методов дегидратации непросто, поскольку механизмы отверждения литейных форм и стержней еще не достаточно изучены.

В настоящее время рабочей группой кафедры «Металлургические технологии и оборудование» Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева проводится комплекс работ по созданию и внедрению в условиях действующего производства инновационного способа изготовления разовых литейных стержней из смесей со связующим на основе неорганических солей, которые априори отличаются своей повышенной гидрофильностью. В русле проблемы, обозначенной в данной статье, особое внимание уделяется выбору рациональной комбинации методов дегидратации, которая учитывала бы природу механизмов отверждения стержня и имеющиеся технические возможности базового предприятия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дибров, И. А. Литейное производство – прогресс машиностроения / И. А. Дибров // Литейщик России. – 2019. – № 8. – С. 13–24.
2. Литейные формовочные материалы : формовочные, стержневые смеси и покрытия : Справочник / А. Н. Болдин [и др.]. – М. : Машиностроение, 2006. – 507 с.
3. Технология и оборудование для производства стержней методом Cold-box-amin / Д. А. Кудрин [и др.] ; под общ. ред. Д. М. Кукуя. – Минск : Новое знание, 2007. – 352 с.
4. Холоднотвердеющие смеси для No-Bake-процесса / Н. А. Кидалов, Н. А. Осипова, И. Е. Поташова, К. О. Рыбальченко, В. В. Лысоченко // Заготовительные производства в машиностроении. – 2019. – Т. 17. – № 3. – С. 99–102.
5. Экологически чистая технология изготовления холоднотвердеющих фосфатных смесей / Е. Н. Евстифеев, В. Н. Смирнов, В. С. Бессарабов, Л. А. Котова, А. В. Журавлев // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2011. – № 6. – С. 41–43.
6. Выбор формовочных материалов для литья по разовым моделям / В. К. Дубровин, Б. А. Кулаков, А. В. Карпинский, Ю. Н. Гойхенберг // Литейщик России. – 2015. – № 7. – С. 12–15.
7. Стержневая смесь для пустотелых лопаток / А. А. Ганеешев, О. Б. Деменов, С. П. Павлинич, В. В. Смирнов, Б. А. Кулаков // Литейщик России. – 2017. – № 10. – С. 19–22.
8. Влияние фосфатборатных соединений на физико-механические свойства фурановой смеси / И. Е. Илларионов, Л. Ш. Пестряева, Ш. В. Садетдинов, О. В. Моисеева // Заготовительные производства в машиностроении. – 2019. – Т. 17. – № 8. – С. 339–341.
9. Роль воды в формовочных смесях // Industrial-wood.ru. – URL : <http://http://industrial-wood.ru/tehnologiya-liteynogo-proizvodstva/10531-rol-vody-v-formovochnyh-smesyah.html> (дата обращения 08.05.2020).
10. Способ изготовления литейных стержней и форм из жидкостеклянных смесей: патент № 2094164 РФ: МПК В22 С9/10, В22 С9/12 / авторы и заявители Иткис З. Я. [и др.]; патентообладатель Челябинский государственный технический университет, опубл. 27.10.1997.
11. Способ изготовления литейных форм и устройств для его реализации: патент № 2077136 РФ: МПК В22С15/02 / авторы и заявители Зубкин В. Е. [и др.] ; патентообладатели Зубкин В. Е., Коновалов В. М., Королев Н. Е., Форапонов А. И.; опубл. 10.04.1997.
12. Способ изготовления стержней для литейных форм: патент № 2261775 РФ: МПК В22 С9/10, В22 С1/10 / авторы и заявители Ануфриева А. Ф. [и др.]; патентообладатель ОАО «Автомобильный завод “Урал”», опубл. 10.10.2005.
13. Способ изготовления литейных стержней и форм: авторское свидетельство № 1002083 СССР: МПК В22 С9/00 / авторы и заявители Власов А. Ф. [и др.]; патентообладатель Предприятие п/я Г-4585, опубл. 07.03.1983, бюл. № 9.
14. Росабоев, А. Т. Способы технологического процесса сушки материалов / А. Т. Росабоев, Д. Х. Игамбердиев // Молодой ученый. – 2016. – № 8(112). – С. 289–291.