

УДК 621.74.041

В. С. Дорошенко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: doro55v@gmail.com

П. Б. Калюжный, канд. техн. наук, науч. сотр., e-mail: kpb.cmw@ukr.net

В. О. Шинский, мл. науч. сотр.

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ СКОРОСТНЫХ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ В ВАКУУМИРУЕМЫЕ ФОРМЫ ДЛЯ РОТОРНО-КОНВЕЙЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

В статье рассмотрены способы интенсификации теплообмена отливки в форме с сыпучим наполнителем для ускорения охлаждения отливок применительно к проектированию роторно-конвейерных комплексов (РКЛ). Они включают подачу хладагента в форму, динамическое и аэродинамическое перемещение формовочного наполнителя вокруг отливки. Показаны примеры применения данных способов для локального повышения свойств чугуновой отливки корпуса блока цилиндров. Применение аэродинамического перемещения формовочного материала для отливок из алюминиевых сплавов позволило повысить их механические свойства в 1,3–1,6 раз.

Ключевые слова: роторно-конвейерные комплексы, литье по газифицируемым моделям, теплообмен, хладагент, скорость охлаждения, формовочный наполнитель, аэродинамическое перемещение, контейнер.

У статті розглянуто способи інтенсифікації теплообміну виливка у формі з сипким наповнювачем для прискорення охолодження виливків стосовно проектування роторно-конвеєрних комплексів (РКЛ). Вони включають подання холодагенту у форму, динамічне і аеродинамічне переміщення формувального наповнювача навколо виливка. Показано приклади застосування цих способів для локального підвищення властивостей чавунного виливка корпусу блоку циліндрів. Застосування аеродинамічного переміщення формувального матеріалу для виливків з алюмінієвих сплавів дозволило підвищити їх механічні властивості в 1,3–1,6 разів.

Ключові слова: роторно-конвеєрні комплекси, лиття за газифікованими моделями, теплообмін, холодоагент, швидкість охолодження, формувальний наповнювач, аеродинамічне переміщення, контейнер.

Methods of intensification of heat exchange of the metallic casting in a mold with a friable filler for the acceleration of cooling of casting that could be applied to planning of rotor-conveyor complexes are considered in a review. They include the feeding of cooling agent in a mold, dynamic and aerodynamic moving of molding filler around casting. The examples of application of these methods to increase the local properties of cast iron cylinder block body are shown. Application of aerodynamic movement of molding material for aluminum castings has allowed to increase their mechanical properties in 1.3–1.6 times.

Keywords: *rotor-conveyer complexes, lost foam casting, heat exchange, refrigerant, cooling rate, molding filler, aerodynamic movement, container.*

Среди актуальных научно-практических задач литейного производства отмечается существенный рост производительности, снижение капиталовложений, энергоемкости, материалоемкости, трудоемкости, сокращение производственных площадей и исключение субъекта из технологического цикла производства отливок. Одновременно имеется тенденция к уменьшению массы литых заготовок для изделий машиностроения, росту их эксплуатационного ресурса, в первую очередь, транспортных средств гражданского и военного назначения и боеприпасов.

Производительность современного оборудования для получения песчаных форм на основе автоматических формовочных линий (АФЛ) не превышает 120–300 форм/ч (в зависимости от крупности отливок), что ограничивает дальнейший рост производительности такого оборудования при получении отливок из железоуглеродистых сплавов. В то же время для эксплуатации действующих АФЛ и вспомогательного оборудования для подготовки, регенерации формовочных материалов и транспортировки их на участки формовки, изготовления стержней с последующим их использованием на АФЛ необходимы значительные производственные площади с невысоким коэффициентом их использования, а удельная стоимость этого оборудования превышает 15–20 тыс. дол. США на тонну литья и часто ухудшает экологическое состояние вокруг литейных объектов, что в совокупности ведет к чрезмерным капитальным расходам, а также тормозит модернизацию и строительство литейных цехов, в том числе для отечественного машиностроения.

В плане устранения перечисленных технико-экономических недостатков альтернативой оборудованию для изготовления отливок на основе АФЛ являются литейные комплексы типа высокоскоростных роторно-конвейерных линий (РКЛ), принцип и ряд примеров которых для машиностроения создал академик Л. М. Кошкин [1]. Литейные комплексы РКЛ по сравнению с АФЛ и традиционной инфраструктурой их обслуживания позволяют увеличить производительность формовки в 10–15 раз, уменьшить операционные запасы материала до 20 раз, высвободить производственные площади, уменьшить энергоемкость и трудоемкость изготовления продукции в 5–10 раз, снизить ее себестоимость, а также сократить капитальные расходы в 2–5 раз и их окупаемость – до 1–3 лет.

Вместе с тем, реализация высокоэффективного оборудования типа РКЛ в литейном производстве не имела успеха потому, что использование этих комплексов нуждается в принципиально новых технологических процессах песчаной формовки для удовлетворения ряда таких основных принципов построения РКЛ, как максимальная скорость перемещения предмета (оснастки), минимальное время формообразования изделия (разовой модели, песчаной формы, а также затвердевания и охлаждения отливки), максимальная плотность потока перемещения предметов (форм, отливок), минимальная ширина потока перемещения предметов (форм, отливок). Для этого технологические процессы должны соответствовать следующим требованиям:

- минимизация времени затвердевания – охлаждения отливки до выбивки из формы и продолжительности изготовления формы, которые в то же время должны быть равнозначными;
- минимизация материалов и оснастки, которые участвуют в формообразовании;
- использование прямолинейных перемещений (горизонтальных / вертикальных) инструмента (оснастки), которые участвуют в технологическом процессе получения формы;
- удаление формовочных материалов из технологической оснастки (опоки, контейнера), главным образом, за счет его гравитационного перемещения;
- заполнение металлом форм с простым вертикальным перемещением элементов оборудования (по соответствующей программе) и заданной скоростью перемещения металла в полости формы независимо от ее сечения;

- наличие возможности получения форм (отливок) разной геометрии и массы;
- максимальное объемное размещение моделей (отливок) в форме (контейнере);
- отсутствие необходимости использования песчаных стержней в форме при получении отливок сложной геометрии;
- регулирование интенсивности теплообмена на границе «металл–форма»;
- быстрый переход к использованию разных сплавов для получения отливок;
- отказ от энергоемких и длительных методов выбивки отливок из формы.

Анализ указанных условий реализации скоростных технологий для построения РКЛ и приведенные ниже технические решения, в сравнении с возможностями современных литейных технологий получения отливок из железоуглеродистых сплавов в песчаных формах, позволяют утверждать, что оптимальными для адаптации к скоростным технологиям обладают разновидности литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) со встроенными в них процессами заполнения формы расплавом металла и кристаллизации отливок под избыточным регулируемым давлением [2], а также ускоренного конвективного охлаждения отливок [3], которые созданы в Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины.

Применение принципов построения РКЛ для литейных процессов на основе скоростных технологий получения отливок ЛГМ-процессом в комплексном использовании с научно-технологическим опытом и конструкторскими решениями позволит достичь указанных выше показателей, увеличить производительность, уменьшить операционные запасы материалов, сократить производственные площади, а также энергоемкость, трудоемкость, себестоимость литья и капитальные затраты, а также ускорить окупаемость затрат. Одновременно это открывает перспективы получения литых конструкций со снижением их массы по сравнению с современной продукцией Украины и стран СНГ в 1,5 раза, а сравнительно с Западной Европой – в 1,3 раза, что, соответственно, ведет к сокращению энергоносителей, шихтовых материалов, трудоемкости при их производстве в 1,5–2,0 раза.

В данной статье предпосылки развития нового направления для теории и практики литейных процессов, каким является реализация скоростных технологий получения отливок на основе использования роторно-конвейерного принципа, рассмотрены с точки зрения выполненных под руководством профессора Шинского О. И. исследований и опыта проектирования ускоренных процессов затвердевания и охлаждения отливок в литейных формах.

Теория литейных процессов традиционно рассматривает литейную песчаную форму в теплофизическом плане как однородное тело, и изменение скорости охлаждения получаемой в этой форме отливки в большинстве применяемых технических процессов возможно только путем замены материала формы. Применение в литейных цехах вакуумируемых форм из песка без связующего, в которых так называемая «химия связующего» уступила место «физике» уплотняющего песок перепада газового давления на границе «литейная полость – песок», позволило применить форму как удобный инструмент ускорения теплообмена между отливкой и формой [3].

В песчаных формах интенсивность теплообмена отливки с формовочным материалом определяется процессом распространения тепла в форме, поскольку отливка не может отдать тепло быстрее, чем может принять форма. Низкий потенциал регулирования теплоотвода в песчаной литейной форме актуализировал разработку способов интенсификации процессов затвердевания и охлаждения отливок в песчаных формах за счет использования так называемой «активной литейной формы» [4], что в свою очередь позволило управлять формированием свойств в отливке.

Именно способ ЛГМ является наиболее подходящим для этих целей, поскольку сухой песок, упрочняемый перепадом давления, легко превратить в «сцементированный» или сыпучий путем включения-выключения вакуума, а пониженным газовым давлением в порах песка можно создать фильтрационный поток газа или жидкости сквозь эти поры. Сыпучие вещества позволяют создать перенос теплоты конвек-

цией путем перемещения их объемов. Анализ технической литературы не позволил обнаружить теоретических описаний влияния движущихся (фильтрующихся под действием поля давления) в порах песка потоков газа или жидкости, либо самого песка (как теплоносителей) на скорость охлаждения и структурообразование металла отливки, находящейся в литейной форме.

Результаты проведенных исследований

В экспериментальной части работы исследовали закономерности теплообмена на границе «металл – форма» при изменении таких характеристик формовочной смеси: 1) теплопроводность дисперсных наполнителей; 2) их пористость; 3) влажность; 4) создание потоков теплоносителя (хладагента) и степень их охлаждения. Исследовали формы с вакуумируемым дисперсным наполнителем, характерным для ЛГМ, в сравнении с традиционными формами из песчаной смеси со связующим. В частности, с целью интенсификации теплообмена сыпучесть наполнителя использовали для принудительного движения песчинок вокруг охлаждаемой отливки, а внутриформенное разрежение использовали как силовое поле в толще формы для принудительного пропускания хладагента (воздуха, воды) через поровое пространство песка вокруг отливки.

Методика экспериментов состояла из термического анализа (с хромель-алюмелевыми термопарами и прибором для записи температуры) затвердевания и охлаждения отливки в контейнерной вакуумируемой песчаной форме. Цилиндрическую чугунную отливку диаметром 50 мм, массой 4 кг при массе песка в форме 24 кг получали методом ЛГМ, при этом на отливку в форме оказывали различные воздействия для регулирования отвода от нее тепла. В таком же контейнере провели сравнительные эксперименты для сырой песчано-глинистой формы, формы с охлажденным песком до низких температур, а также с наполнителем в виде металлической дробы. Термический анализ охлаждения цилиндрической отливки выполняли при заливке в форму расплавленного чугуна СЧ20 при температуре в ковше 1310 ± 10 °С. А также для снижения трудоемкости десятки экспериментов провели в лаборатории с нагретым до 610 ± 10 °С стальным образцом, заформованным в различного вида огнеупорный наполнитель.

Формовочный контейнер был сконструирован так, что имел на двух противоположных боковых стенках по три отверстия, закрытые мелкой сеткой, и приваренные в этих местах патрубки. Такая конструкция контейнера позволяла вакуумировать форму через три патрубка на одной стенке (подключенные к вакуумному водокольцевому насосу ВВН1–1,5) и подавать воздух внутрь контейнера через три патрубка на другой стенке. В ряде экспериментов продувание песка выполняли через разное количество патрубков за счет вакуумирования с остаточным давлением воздуха в песчаной форме на уровне 50 кПа.

Всего было проведено около сотни опытов термического анализа путем измерения термопарами через каждые 5 с и записи температуры стального образца или чугунной отливки. Продолжительность каждой операции термического анализа составляла до 2 часов, однако для сравнения скорости охлаждения образцов выбрали период – первые 40 мин., поскольку дальнейший процесс охлаждения протекает при температурах, которые рекомендуются для выбивки форм, и оказывает слабое влияние на свойства отливок. Усредненные результаты экспериментов показали, что дифференцирование теплофизических свойств формы возможно за счет изготовления ее из наполнителя с различной степенью уплотнения. Песок без уплотнения имеет наименьшую теплопроводность, однако его продувание сильнее ускоряет охлаждение отливки, чем продувание уплотненного песка. Это обусловлено снижением пористости песка, которая увеличивает сопротивление фильтрации воздуха. Однако в производстве песчаные формы без виброуплотнения не применяют из-за опасности появления брака отливок в зонах слабого уплотнения песка.

Ускорение отвода тепла отливки достигали интенсификацией продувания песка формы воздухом, подачей воды в песок над металлическим образцом (с использованием фазового перехода теплоносителя), применением оборотного песка с са-

жистыми остатками продуктов газификации моделей при ЛГМ, заменой кварцевого песка на стальную дробь, предварительное охлаждение наполнителя в морозильной камере. Кроме того, удаляли сухой песок вокруг отливки после образования на ней твердой корки с дальнейшим охлаждением отливки в пустом контейнере с крышкой и без крышки только под влиянием окружающего воздуха.

Эксперименты показали возможность увеличения скорости охлаждения отливки в песчаной форме более чем в 2 раза, а наибольшей скорости достигли при гравитационном высыпании кварцевого песка с регулируемой скоростью через отверстие в контейнере с донной разгрузкой [5]. В нижней части таких контейнеров установлен затвор для их опустошения без опрокидывания. В экспериментах после заливки формы и затвердевания отливки через отверстие внизу контейнера песок из формы высыпали в нижестоящий короб как в песочных часах. При этом опускание отливки на дно контейнера в среде обтекающего ее песка (конвективный отвод тепла текучей средой) с дальнейшим охлаждением на воздухе сочетает операции охлаждения отливки в форме с выбивкой самопроизвольным удалением песка [6] через дозирующее щелевое отверстие в контейнере. Ширину этого отверстия регулировали вплоть до полного его открытия степенью перемещения затвора.

Также было определено влияние динамического перемещения сухого несвязанного песка вокруг отливки на скорость ее охлаждения. Для чего использовали специальный вибростол (с переменной амплитудой и частотой), на котором размещали контейнер с нагретым образцом, и проводили измерение температур образца и песка формы. Результаты экспериментов показали, что скорость охлаждения образца при виброперемещении наполнителя формы составляет $0,1-0,12$ °C/с, что идентично продувке песка воздухом. Интенсификация теплообмена между отливкой и формой происходит за счет того, что вибрация формы способствует перемещению нагретого наполнителя из контактной зоны с отливкой, что в свою очередь ускоряет ее охлаждение.

Дозированная подача хладагента в песчаную форму переносными устройствами

Поскольку продувание песка формы требует длительной работы вакуумного насоса, то были исследованы способы регулирования теплообмена отливки с формой при ЛГМ с помощью переносных емкостей-дозаторов с отъемными трубками для подачи жидкого хладагента в форму [7]. При формовке в песок помещают металлическую трубку так, что отливка в форме находится на пути движения хладагента от нижнего конца трубки до средства вакуумирования песка, закрепленного на внутренней стенке контейнера. На рис. 1, а показана форма, содержащая песок 1, вакуумируемый через фильтры 2, и отливку 3, полученную ЛГМ-процессом. Верх формы покрыт пленкой 4, а остальные стенки загерметизированы контейнером (не показан). Емкость-дозатор 5 имеет отъемный трубчатый штырь 6 (рис. 1, б), дозирующую шайбу 7 и конусную пробку 8. Для отливки блока цилиндров 9 (рис. 1, в), трубчатые штыри 6 закреплены на планке 10 с заданным интервалом и вставлены в отверстия цилиндров.

После заливки формы в начале затвердевания отливки в емкость 5 заливают отмеренное количество воды, которая через трубчатый штырь 6 затекает в песок при вакуумировании через фильтры 2 с герметизацией песка пленкой 4. Точку подачи хладагента располагают между отливками на пути просачивания его к фильтрам и охлаждают не одну, а весь «куст» отливок. Установка трубчатых штырей в локальных зонах формы вблизи отдельных частей или поверхностей отливок приводит к увлажнению контактирующих с ними объемов песка, а другие части отливки остывают в обычном режиме. В увлажненных зонах песка, в которых произошла конденсация пара или фильтрация воды, значительно повышается теплопроводность по сравнению с сухим песком. Такого типа песчаная форма позволяет получать отливки с дифференцированными свойствами.

В результате исследований был установлен механизм процессов, происходящих при фильтрации воды в порах песка под действием вакуума. В увлажненном песке при росте относительной влажности W от 0,5 до 8,5 % газопроницаемость в целом

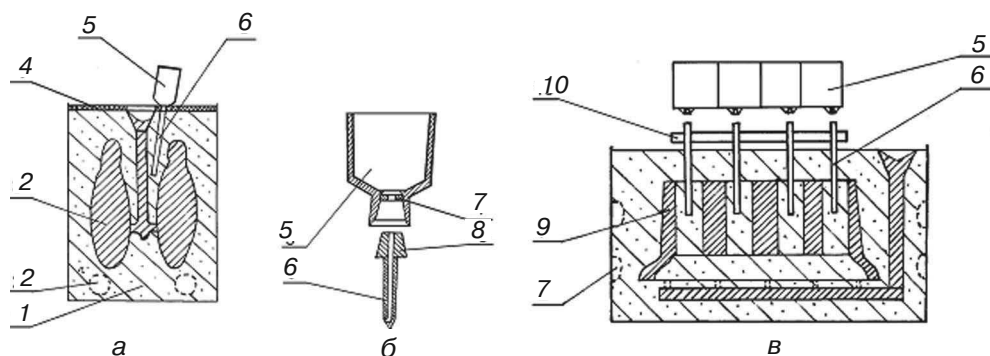


Рис. 1. Вакуумируемые формы с дозаторами воды: контейнерная форма с дозатором воды (а); разборная емкость-дозатор (б); форма с отливкой типа блока цилиндров (в): 1 – песок; 2 – фильтры; 3 – отливка; 4 – пленка; 5 – емкость-дозатор; 6 – трубчатый штырь; 7 – дозирующая шайба; 8 – конусная пробка; 9 – отливка блока цилиндров; 10 – планка

снижается в несколько раз (приблизительно со 140 до 35 ед.). Движение воды и пара (от контакта воды с нагретым отливкой песком) проходит в песчаной среде по пути наименьшего сопротивления (наибольшей газопроницаемости и «наибольшего вакуума»). Влага, обходя влажные, устремляется к более сухим объемам песка и распределяется от трубки во все стороны, но больше в сторону вакуумного фильтра. Установка точки подачи воды так, чтобы на ее пути была отливка, обеспечивает охлаждение последней с интенсивностью, которая регулируется количеством и скоростью протекания воды и пара в песке вблизи отливки. Подача воды дозатором совмещается с вакуумной сушкой формы. Вода взаимодействует с песком в два этапа: при контакте с горячим песком она испаряется, пар конденсируется в холодных зонах песка вокруг отливки, затем по мере прогрева этих зон влага распространяется с характерным движением переувлажненной зоны песка и последующим высыханием под воздействием вакуума, что ускоряет охлаждение отливки и песка.

Кроме предварительной установки при засыпке песка, заостренные трубки диаметром 5–8 мм также вводили в песок, пробивая герметизирующую синтетическую пленку на контрладе формы и приставляя после заливки металла к ним воронки для воды. Вода в количестве до 0,1–1 л засасывалась вакуумом в течение 10–100 с, что определялось требованиями к режиму охлаждения.

Согласно исследованиям влияния добавок воды к кварцевому песку на теплопроводность λ песка в смесях с водой, значение λ растет с увеличением относительной влажности W , однако при $W > 8\%$ наблюдается снижение λ у смеси объемного веса 1470 кг/м^3 [8]. Эти данные использовали для ускоренного охлаждения со стороны отдельных поверхностей отливки для повышения их твердости при том, что вся отливка охлаждается по традиционному режиму [9]. Для отливки блока цилиндров как одной из наиболее сложных литых деталей поршневых двигателей, от качества которой зависит их ресурс эксплуатации, поверхностный слой внутри цилиндров (гильз, цельнолитых в блоке) желательно получить с твердостью выше, чем в целом для всей отливки. Для отливки блока цилиндров с трущимися поверхностями (поршней о цилиндры) и других подобных отливок избирательным охлаждением внутренней поверхности цилиндра можно повысить твердость этой поверхности до 270–300 HB (соответственно, повышая прочность). А на остальных частях отливки получить более низкую твердость, оптимальную для механической обработки на обрабатывающих центрах без излишнего износа режущего инструмента. Установили, что увлажнять локальный объем песка выше 8 % не следует, так как подача в песок внутрь цилиндра отливки излишнего количества влаги приводит к накоплению ее в нежелательных местах формы и может в той зоне повысить твердость отливки, что увеличит затраты на механическую обработку, а также может переувлажнить отдельные зоны песка и затруднить его высыпание из опоки.

Если после подачи воды вакуумирование прекращают или закрывают отверстия, через которые она подавалась в форму, то влага из полости цилиндра не уносится потоком воздуха, засасываемого через эти отверстия разрежением формы, а накапливается и затем мигрирует при нагреве песка как в сырой песчано-глинистой форме. Подача воды в объемы песка до нагрева их выше температуры кипения воды обеспечивает спокойную ее фильтрацию без образования пара. Поэтому удобно подавать воду в песок сразу после заливки металлом, а скорость впитывания регулировать величиной разрежения или диаметром отверстий трубчатых штырей.

Описанный (см. рис. 1) способ ускоренного охлаждения позволяет не только ускорить процесс затвердевания и охлаждения отливки, необходимый для синхронизации операций при проектировании РКЛ, но и упрочнит структуру металла. Последнее служит основанием для снижения массы отливки путем утонения стенок без снижения ее служебных свойств. Например, в графитизированном чугуне увеличивается количество связанного углерода и перлита, что повышает твердость и прочность металла, по сравнению с чугуном в стенках той же отливки, контактирующими с сухим песком.

Охлаждение отливки при освобождении части ее поверхности от песка в литейной форме

Если вода является весьма активным охладителем, влияние которого при малых скоростях охлаждения отливок трудно регулировать, то с помощью газа можно достичь «тонкого» регулирования при слабом стимулировании охлаждения. Создание на отливке поверхностных зон с различными свойствами предусмотрено способом, в котором хладагент подают на поверхность отливки, освобожденной от песка [10]. В вариантах способа в качестве хладагента используют свободно движущийся воздух или поток воздуха, например, создаваемый вакуумированием формы с частичной ее разгерметизацией.

В потоке воздуха могут диспергировать воду или использовать поток охлажденного газа, а освобождение от песка производят путем его отсоса с применением вакуума в устройстве, подобном бытовому пылесосу, который легко удаляет сухой песок формы. Для регулирования охлаждения освобожденные от горячего песка части отливок предложено покрывать песком или другим материалом со свойствами, отличными от удаленного песка, а для чугунных отливок, в частности, удалять песок до достижения металла температуры эвтектичного превращения.

Применение этого способа показано опять же на примере отливок блоков цилиндров при освобождении от песка внутренней поверхности каждого цилиндра. Условно изображены части песчаной формы с песком 1 (рис. 2) в разрезе по оси одного из цилиндров (гильз) 2 отливки, затвердевшей в форме, где происходит ее охлаждение. Форма выполнена в контейнере (не показан) и изображена на стадии, когда часть верхнего слоя песка удалена с контрлада 3, из полости цилиндра 2, а часть песка находится под углом естественного откоса 4 (рис. 2, а). В другом варианте (рис. 2, б) на отливку могут ставить патрубок 5, верхнее отверстие которого можно частично закрывать съемной крышкой, регулируя конвективные движения воздуха.

Применение аэродинамического перемещения огнеупорного наполнителя для повышения свойств отливок

Преимущество ЛГМ, заключающееся в использовании сухого песка без связующего, позволяет кардинально изменить механизм теплообмена в форме за счет создания интенсивного перемешивания частиц формовочного материала (ФМ) путем соответствующей организации аэродинамики. Так, если насыпной слой формовочного материала продувать вертикальным потоком воздуха, то при определенной скорости потока аэродинамическая сила, действующая на частицу ФМ, станет равна ее весу, а насыпной слой ФМ перейдет в псевдоожиженное состояние. Поскольку насыпной слой ФМ является, по сути, теплоизолятором, а псевдоожиженный слой ФМ имеет высокую теплопроводность, способную превысить теплопроводность металлов [11], то эти преимущества были использованы при разработке нового способа управления теплообменом в литейной форме.

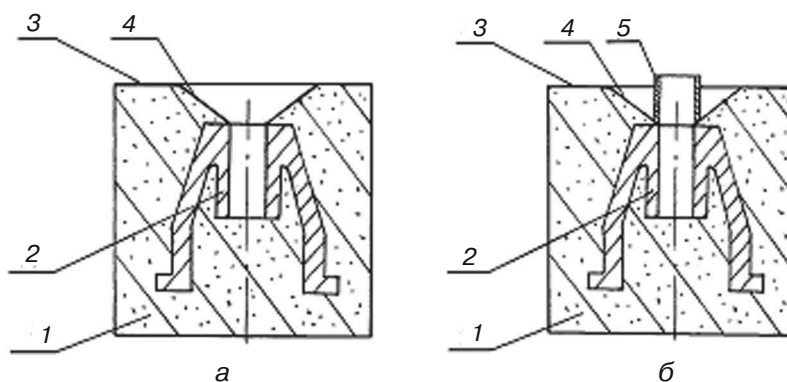


Рис. 2. Литейная форма: в разрезе по оси цилиндра отливки (а); то же с патрубком, установленном на отливке (б): 1 – песок; 2 – цилиндр (гильза) отливки блока цилиндров; 3 – контрлад; 4 – естественный откос песка; 5 – патрубок

Реализация такого способа ускоренного охлаждения отливки для ЛГМ предложена следующим образом [12]. В контейнере 1 (рис. 3) формируют газифицируемую модель, засыпав сухой песок 2 на пористое (перфорированное) дно 3, и вакуумируют форму через полость 4.

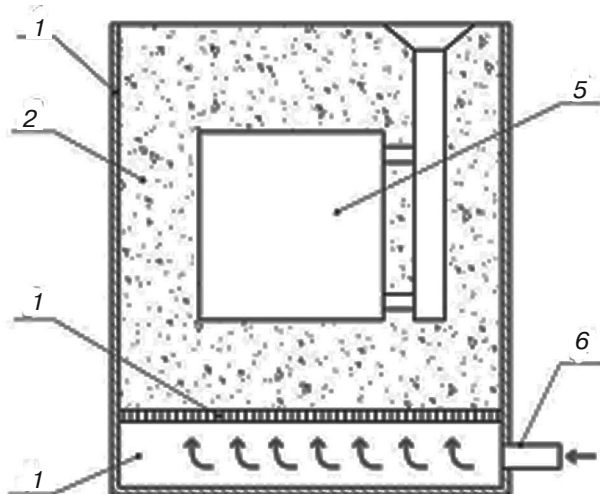


Рис. 3. Схема охлаждения отливки в контейнере: 1 – контейнер, 2 – песок, 3 – перфорированное дно, 4 – полость, 5 – отливка, 6 – штуцер

После заливки расплава в форму от штуцера 6 контейнера отключают вакуум. Вместо вакуума к штуцеру 6 подключают сжатый воздух, и, регулируя расход воздуха, создают псевдоожиженный слой песка в контейнере. Охлаждение отливки 5 таким образом ведут до необходимой температуры отливки или по заданному режиму.

Авторами проведены сравнительные эксперименты по охлаждению алюминиевого цилиндрического образца, которые показали, что начальная скорость охлаждения отливки в неподвижном (уплотненном вибрацией) песке составляет 0,06–0,12 °С/с, в то время как в псевдоожиженном слое песка скорость охлаждения

отливки – 1,7–2,9 °С/с, то есть в 22–28 раз выше. Аэродинамическое перемещение ФМ в контейнере существенно интенсифицирует процесс теплообмена отливки с частицами ФМ.

В следующем цикле экспериментов определили влияние аэродинамического перемещения ФМ на формирование механических свойства отливок, в частности, из алюминиевых сплавов, поскольку столь значительное увеличение скорости кристаллизации и охлаждения отливки приводит к получению сверхмелкозернистой структуры металла и повышает его свойства. Для этого в литейном цехе ФТИМС НАН Украины по ЛГМ-процессу с аэродинамическим перемещением ФМ в контейнере были изготовлены партии отливок «Корпус тормозного крана», «Уголок» и «Крышка» из сплава АК9, АК5М2 и АК7 ДСТУ 2839-94, соответственно. Данные отливки были изготовлены по базовой (традиционной) технологии ЛГМ без применения каких-либо воздействий, а также по новой технологии ЛГМ с аэродинамическим перемещением ФМ. Последняя техноло-

гическая схема предполагала, что после заливки расплава в вакуумируемую форму выдерживали определенное время, на протяжении которого успела образоваться поверхностная корка металла, а основной объем металла еще не кристаллизовался. В этот момент отключали от контейнера вакуум и включали подачу сжатого воздуха, создавая в контейнере псевдооживленный слой песка. Аэродинамическое перемещение в контейнере поддерживали на протяжении 180 с, после чего отключали сжатый воздух и выдерживали отливку в контейнере еще до 10 мин. Затем песок высыпали из контейнера, и отливка охлаждалась на воздухе до комнатной температуры.

Определение механических свойств сплавов проводили на заготовках, которые были отлиты при тех же условиях, что и отливки. По стандартным методикам были определены временное сопротивление разрыву, относительное удлинение и твердость сплавов (без термической обработки), результаты измерений которых приведены в таблице.

В результате механических испытаний было установлено, что предел прочности и

Технические свойства алюминиевых сплавов

Марка сплава	Способ литья	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость по Бринеллю, НВ
АК9	З, К (ДСТУ 2839-94)	157	1,0	60
	ЛГМ (базовый)	146–152	0,8–0,85	64–69
	ЛГМ с аэродинамическим перемещением ФМ	198–223	1,1–1,2	80–82
АК5М2	З (ДСТУ 2839-94)	118	–	65
	К (ДСТУ 2839-94)	157	0,5	65
	ЛГМ (базовый)	115–127	0,2	65–67
	ЛГМ с аэродинамическим перемещением ФМ	164–172	0,7–0,9	68–72
АК7	З (ДСТУ 2839-94)	127	0,5	60
	К (ДСТУ 2839-94)	157	1,0	60
	ЛГМ (базовый)	125–134	0,4–0,6	61–63
	ЛГМ с аэродинамическим перемещением ФМ	165–174	1,1–1,3	64–70

пластичность алюминиевых сплавов АК9, АК5М2 и АК7 в отливках, которые во время их затвердевания и охлаждения в форме из кварцевого песка 2К₂О₂016 ГОСТ 2138-91 подвергались воздействию аэродинамического перемещения в контейнере, выше в 1,3–1,5 и 1,4–1,6 раза, соответственно, в сравнении с отливками, полученными по базовой технологии ЛГМ. Установлено незначительное увеличение твердости в отливках, полученных по технологической схеме с аэродинамическим перемещением ФМ в контейнере. Полученные механические свойства отливок из алюминиевых сплавов при использовании технологии ЛГМ с применением аэродинамического перемещения ФМ в литейном контейнере не уступают механическим свойствам алюминиевых отливок, регламентируемых ДСТУ 2839-94 для литья в кокиль.

На основе проведенных исследований были разработаны технологические схемы по применению аэродинамического перемещения ФМ в контейнере с целью: обеспечения необходимого уровня механических свойств отливок; повышения эффективности производства; выравнивания продолжительности операций формовки, заливки, затвердевания; охлаждения отливок до равнозначных величин, применимых для проектирования РКЛ.

Основным отличием первой технологической схемы от обычного технологиче-

ского процесса ЛГМ является стадия выдержки отливок в форме для образования поверхностной корки металла и создания аэродинамического перемещения ФМ при кристаллизации металла. Вторая технологическая схема предусматривает аэродинамическое перемещение ФМ в контейнере для интенсификации охлаждения затвердевших отливок и позволяет значительно сократить производственный цикл за счет уменьшения времени охлаждения отливки в форме, которое, по экспериментальным данным авторов, можно уменьшить в 10–12 раз.

Перспективы дальнейших исследований по интенсивному охлаждению методом аэродинамического перемещения ФМ отливок из железоуглеродистых сплавов близки тематике изотермической закалки отливок для получения структуры нижнего или бескарбидного бейнита (аусферрита) из литого состояния [13, 14]. При этом используют преимущества ЛГМ-процесса, связанные с быстрым извлечением из формы горячей отливки (красного цвета) в аустенитном состоянии путем быстрого высыпания песка их формы через челюстной затвор либо извлечением отливки краном вверх из песка после прекращения вакуумирования формы. В том числе предложено извлечение в проволочной корзине, вставленной в контейнерную опоку перед формовкой. При этом горячие отливки в корзине или в контейнере без песка с формовочно-заливочной роторной карусели удобно переставить на смежную аналогичную карусель для термообработки, реализуя принцип РКЛ. Также предусмотрено использовать нагретый формовочный песок для изотермической выдержки отливок при температуре 350 ± 50 °С.

Рассмотренные в статье результаты исследований, а также способы формовки и охлаждения отливки в песчаной форме, как исходные данные для проектирования РКЛ, раскрывают обширные возможности вакуумируемых форм, основные из которых показаны на схеме (рис. 4). Указанные на схеме способы литья под газовым избыточным давлением описаны в работе [2], получение тонкостенных, в том числе ячеисто-каркасных отливок, – в работе [15], а охлаждение отливок в псевдооживленном слое песка – в работах [12, 16].



Рис. 4. Технологические возможности вакуумируемой песчаной формы в герметичной опочной оснастке, содержащей сыпучую песчаную среду

Способы ускоренного охлаждения отливок, рассмотренные в статье и отражающие несложные технологические решения на основе проведенных экспериментов, раскрывают потенциал вакуумируемых песчаных форм в качестве технологических принципов, дающих основания для проектирования РКЛ, а также для регулирования теплообмена между отливкой и литейной формой. Интенсификация теплообмена при затвердевании и охлаждении отливок позволяет повысить их механические свойства, это дает возможность уменьшить толщину стенки литой заготовки, что, в свою очередь, приведет к уменьшению массы детали и экономии металла с сопутствующей экономией ресурсов для его литья и последующей эксплуатации литой конструкции.



Список литературы

1. Кошкин Л. Н. Роторные и роторно-конвейерные линии: 3-е изд. перераб. и доп. – М. Машиностроение, 1991. – 400 с.
2. Дорошенко В. С. Литье по газифицируемым моделям с кристаллизацией металла под давлением // Литейное производство. – 2016. – № 1. – С. 25–28.
3. Шинский О. И., Дорошенко В. С., Кравченко В. П. Интенсификация теплообмена отливки с дисперсным наполнителем литейной формы при применении хладагента и вынужденной конвекции // Процессы литья. – 2009. – № 5. – С. 74–82.
4. Шинский О. И., Дорошенко В. С. Концепция «активной» формы // Литье-2007: Тезисы докладов. - К. – 2007. – С. 35–36.
5. Дорошенко В. С., Бердыев К. Х. Современные тенденции конструирования опочной оснастки для ЛГМ // Металл и литье Украины. – 2011. – № 4. – С. 24–29.
6. Дорошенко В. С. Регулирование охлаждения отливки в вакуумируемой форме фильтрацией хладагентов и движением частиц песка // Литейное производство. – 2013. – № 10. – С. 32–37.
7. Патент Украины 80928, МПК В22С 9/02. Литейная форма для вакуумной формовки / О. И. Шинский, В. С. Дорошенко и др. – Оpubл. 2007, Бюл. № 18.
8. Носков Б. А., Яноввер Я. Д. Исследование теплофизических характеристик формовочных материалов методами регулярного режима // Известия вузов – 1971. – №11. – С. 147–151.
9. Патент Украины 85516, МПК В22С 9/02, В22Д 27/04. Способ изготовления отливки корпуса блока цилиндров / О. И. Шинский, В. С. Дорошенко и др. – Оpubл. 2009, Бюл. № 2.
10. Патент Украины 82963, МПК В22Д27/04, В22Д27/15. Способ изготовления отливки в песчаной форме с регулируемым охлаждением отдельных ее частей / О. И. Шинский, В. С. Дорошенко, С. И. Клименко – Оpubл. 2008, Бюл. № 6.
11. Заваров А. С., Баскаков А. П., Грачев С. В. Термическая обработка в кипящем слое. – М.: Металлургия, 1981. – 84 с.
12. Патент Украины 97151, МПК В22Д 27/04. Способ охлаждения отливок в литейной форме / П. Б. Калюжный, А. Н. Голофаев, Ю. И. Гутько. – Оpubл. 2015, Бюл. №5.
13. Дорошенко В. С. О получении аусферритного чугуна из литого состояния при ЛГМ-процессе // Процессы литья. – 2017. - № 4. – С. 35–43.
14. Дорошенко В. С. Предпосылки встраивания термообработки в процесс литья высокопрочного чугуна по газифицируемым моделям // Металл и литье Украины. – 2017. – № 6–7. – С. 10–16.
15. Дорошенко В. С. Способы получения каркасных и ячеистых литых материалов и деталей по газифицируемым моделям // Литейное производство. – 2008. – №9. – С. 28–32.
16. Дорошенко В.С., Клименко С. И., Калюжный П. Б. Интенсификация теплоотвода при охлаждении отливок в литейной форме с сыпучим наполнителем методом его псевдооживления // Металл и литье Украины. – 2016. – № 6. – С. 22–26.



References

1. Koshkin, L. N. (1991) Rotornyye i rotorno-konveyernyye linii [*Rotary and rotor-conveyor lines*]. 3-e izd. pererab. i dop. Moscow: Mashinostroenie, 400 s. [in Russian].
2. Doroshenko, V. S. (2016) Lit'e po gazifiziruemyim modeljam s kristallizaciej metalla pod davleniem [*Lost foam casting with metal crystallization under pressure*]. Litejnoe proizvodstvo, no. 1, pp. 25–28 [in Russian].
3. Shinskiy, O. I., Doroshenko, V. S., Kravchenko, V. P. (2009) Intensifikacija teploobmena otlivki s dispersnym napolnitelem litejnoj formy pri primenenii hladagenta i vynuzhdennoj konvekcii [*Intensification of the casting heat exchange with the disperse filler of the mold ussng refrigerant and forced convection*]. Processy lit'ja, no. 5, pp. 74–82 [in Russian].

4. Shinskiy, O. I., Doroshenko, V. S. (2007) Kontseptsiya «aktivnoy» formy [Conception of «active» mold]. Lite-2007: Tezisy dokladov. K.: Redaktsiya zhurnala «Protsessy litya», pp. 35–36 [in Russian].
5. Doroshenko, V. S., Berdyev, K. H. (2011) Sovremennye tendencii konstruirovaniya opochnoy osnastki dlja LGM [Modern trends in design of flask equipment for lost foam casting]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 4, pp. 24–29 [in Russian].
6. Doroshenko, V. S. (2013) Regulirovanie ohlazhdeniya otlivki v vakuumiruemoj forme fil'traciej hladagentov i dvizheniem chastic peska [Regulation of casting cooling in the vacuumized form of a filtration refrigerants and movement of sand particles]. Litejnoe proizvodstvo, no. 10, pp. 32–37 [in Russian].
7. Shinskiy, O. I., Doroshenko, V. S. et al. (2007) Litejnaja forma dlja vakuumnoj formovki [The mold for vacuum forming]. Patent UA, no. 80928.
8. Noskov, B. A., Janover, Ja. D. (1971) Issledovanie teplofizicheskikharakteristik formovochnyh materialov metodami reguljarnogo rezhima [Investigation of thermophysical characteristics of molding materials by regular-mode methods]. Izvestija vuzov, no. 11, pp. 147–151 [in Russian].
9. Shinskiy, O. I., Doroshenko, V. S. et al. (2009) Sposob izgotovlenija otlivki korpusa bloka cilindrov [The method for manufacturing the casting of the cylinder block body]. Patent UA, no. 85516.
10. Shinskiy, O. I., Doroshenko, V. S., Klimenko, S. I. (2008) Sposob izgotovlenija otlivki v peschanoj forme s reguliruемым ohlazhdeniem otdel'nyh ee chastej [The method of manufacturing a casting in sand mold with controlled cooling of its individual parts]. Patent UA, no. 82963.
11. Zavarov, A. S., Baskakov, A. P., Grachev, S. V. (1981) Termicheskaja obrabotka v kipjashhem sloe [Heat treatment in fluidized bed]. Moscow: Metallurgija Publ., 84 p. [in Russian].
12. Kalyuzhnyy, P. B., Golofaev, A. N., Gut'ko, Ju. I. (2015) Sposob ohlazhdenija otlivok v litejnoj forme [Method of castings cooling in a mold]. Patent UA, no. 97151.
13. Doroshenko, V. S. (2017) O poluchenii ausferritnogo chuguna iz litogo sostoyaniya pri LGM-protsesse [About the receipt of ausferritic cast-iron from the cast state at a LGM-processes]. Protsessy litya, no. 4, pp. 35–43 [in Russian].
14. Doroshenko, V. S. (2017) Predposylki vstraivaniya termoobrabotki v protsess litya vysoko-prochnogo chuguna po gazifitsiruемым modeljam [Pre-conditions of building of heat treatment in the process of casting of high-strength cast-iron on gasifiable models]. Metall i lite Ukrainy, no. 6–7, pp. 10–16 [in Russian].
15. Doroshenko, V. S. (2008) Sposoby poluchenija karkasnyh i jacheistyh lityh materialov i detalej po gazificiruемым modeljam [Methods for producing wireframe and cellular cast materials and parts for gasifying models]. Litejnoe proizvodstvo, no. 9, pp. 28–32 [in Russian].
16. Doroshenko, V. S., Klimenko S. I., Kalyuzhnyy, P. B. (2016) Intensifikacija teplootvoda pri ohlazhdenii otlivok v litejnoj forme s sypuchim napolnitelem metodom ego psevdoozhizhenija [The intensification of the heat removal with cooling castings in a mold with particulate filler by its fluidization]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 6, pp. 22–26 [in Russian].

Поступила 19.03.2018