



УДК 621.74.041

Поступила 13.10.2017

## РЕГУЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ЛИТЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИНТЕНСИФИКАЦИЕЙ ТЕПЛООБМЕНА В ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЕ С ГАЗИФИЦИРУЕМОЙ МОДЕЛЬЮ

## REGULATING OF CAST CONSTRUCTIONS PROPERTIES BY INTENSIFYING HEAT EXCHANGE IN MOLD WITH GASIFIED PATTERN

*О. И. ШИНСКИЙ*, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев, Украина, пр. Вернадского, 34/1. E-mail: aluprt@mail.ru,

*Е. И. МАРУКОВИЧ*, Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь, ул. Б.-Бирюли, 11. E-mail: maruko46@mail.ru,

*В. С. ДОРОШЕНКО, П. Б. КАЛЮЖНЫЙ*, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев, Украина, пр. Вернадского, 34/1. E-mail: doro55@gmail.com

*O. I. SHINSKY*, Physico-technological Institute of metals and alloys of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, 34/1, Vernadskogo ave. E-mail: aluprt@mail.ru,

*E. I. MARUKOVICH*, Institute of technology of metals of NAS Belarus, Mogilev, Belarus, 11, B.-Birulya str, e-mail: maruko46@mail.ru,

*V. S. DOROSHENKO, P. B. KALUZNY*, Physico-technological Institute of metals and alloys of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, 34/1, Vernadskogo ave. E-mail: doro55@gmail.com

*В работе рассмотрены способы, позволяющие интенсифицировать теплообмен отливки в форме с сыпучим наполнителем. Эти методы включают подачу хладагента в форму, динамическое и аэродинамическое перемещение огнеупорного 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.*

*The paper discusses ways to intensify the heat exchange of the casting in the mold of particulate filler. These methods include the supply of refrigerant to the mold, the dynamic and aerodynamic movement of the refractory filler around the 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.*

**Ключевые слова.** *Литье по газифицируемым моделям, теплообмен, хладагент, скорость охлаждения, формовочный наполнитель, аэродинамическое перемещение, контейнер.*

**Keywords.** *Lost foam casting, heat exchange, refrigerant, cooling rate, molding filler, aerodynamic movement, container.*

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 техпроцессов возможно только путем замены материала формы. Появление в литейных цехах вакуумируемых форм из песка без связующего, в которых, образно говоря, «химия связующего» уступила место «физике» уплотняющего песок перепада газового давления на границе «литейная полость–песок» позволило применить форму как удобный инструмент управления теплообменом между отливкой и формой [1].

В песчаных формах теплообмен отливки с формовочным материалом определяется процессом распространения тепла в форме, поскольку отливка может отдать тепла больше, чем может принять форма. Это говорит о том, что песчаная литейная форма имеет потенциал повышения теплоотвода. Поэтому актуальным является разработка способов интенсификации процессов затвердевания и охлаждения отли-

вок в песчаных формах за счет использования «активной формы», что в свою очередь позволит управлять формированием свойств в отливке.

Именно способ литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) – наиболее подходящий для этих целей, поскольку сухой песок, упрочняемый перепадом давления, легко превратить в «цементированный» 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 конвекцией путем перемещения их объемов, но анализ 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.

**Проведенные исследования.** В экспериментальной части работы исследовали закономерности теплообмена на границе «металл – форма» при изменении таких характеристик формовочной смеси, как теплопроводность дисперсных наполнителей, их пористость, влажность, создание потоков теплоносителя и др. Исследовали формы с вакуумируемым дисперсным наполнителем (обычно используемые при ЛГМ) в сравнении с традиционными формами. В частности, с целью интенсификации теплообмена сыпучести наполнителя использовали для принудительного движения песчинок вокруг охлаждаемой отливки, а внутриформенное разрежение – как силовой фактор для принудительного пропускания хладагента (воздуха, воды) через поровое пространство песка вокруг отливки.

Методика экспериментов основывалась на термическом анализе (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  $1310 \pm 10$  °С, также для снижения трудоемкости ряд экспериментов проводили в лаборатории с нагретым до  $610 \pm 10$  °С стальным образцом, заформованным в различного вида огнеупорный наполнитель.

Контейнер 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 90 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 ч, однако для сравнения скорости охлаждения образцов выбрали 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 приведены в табл. 1, 2 по степени увеличения скорости охлаждения.

Таблица 1. Скорости охлаждения металлического образца от температуры  $610 \pm 10$  °С

№ п/п	Режим охлаждения стального образца	Скорость, °С/с
1	В кварцевом песке без уплотнения и продувания	0,068
2	В кварцевом песке, уплотненном вибрацией	0,075
3	В кварцевом песке, продувание через 1 штуцер	0,086
4	В обратном кварцевом песке без продувания	0,091
5	В кварцевом песке без уплотнения, продувание через 1 штуцер	0,092
6	В кварцевом песке, продувание через 2 штуцера	0,095
7	В стальной дробы без воздействия	0,107
8	В кварцевом песке, продувание через 3 штуцера	0,108
9	В обратном песке, продувание через 3 штуцера	0,110
10	Добавка в кварцевый песок 100 г воды, продувание через 3 штуцера	0,113
11	В кварцевом песке, охлажденном в морозильной камере ( $-12$ °С)	0,117

№ п/п	Режим охлаждения стального образца	Скорость, °C/с
12	Добавка в кварцевый песок 200 г воды, продувание через 3 штуцера	0,119
13	В стальной дробь, охлажденной в морозильной камере (-38 °C)	0,121
14	В стальной дробь, продувание через 3 штуцера	0,125
15	Охлаждение на воздухе в пустом контейнере с крышкой	0,125
16	Добавка в песок 400 г воды (1,7%), продувание через 3 штуцера	0,129
17	В увлажненном оборотном песке (5%), продувание через 3 штуцера	0,130
18	Охлаждение на воздухе в пустом контейнере без крышки	0,138

Таблица 2. Скорости охлаждения чугунной отливки от температуры 1310 ±10 °C

№ п/п	Режим охлаждения чугунной отливки	Скорость, °C/с
1	В кварцевом песке	0,198
2	В оборотном кварцевом песке	0,209
3	Добавка в кварцевый песок 200 г воды	0,217
4	В сырой песчано-глинистой смеси	0,251
5	В кварцевом песке с высыпанием через отверстие в опоке	0,315

Дифференцирование теплофизических свойств формы возможно за счет изготовления ее из наполнителя с различной степенью уплотнения. В табл. 1 п. 1 и 5 соответствуют формовке песка без уплотнения. Остальные пункты показывают скорость охлаждения в предварительно уплотненном песке формы при вибрации с частотой 50 Гц с амплитудой 0,7 мм. Песок без уплотнения имеет наименьшую теплопроводность (табл. 1, п. 1), однако его продувание сильнее ускоряет охлаждение отливки, чем продувание уплотненного песка (табл. 1, п. 3, 5). 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.

По скорости охлаждения металлических образцов в среде различных формовочных наполнителей (табл. 1) можно выделить три группы режимов охлаждения. Наиболее медленное охлаждение в первой группе (п. 1–6), с большей скоростью – во второй группе (п. 7–12) и с еще большей – в третьей группе (п. 13–18). Ускорение отвода тепла достигали интенсификацией продувания песка формы воздухом, подачей воды в песок над образцом (с использованием фазового перехода теплоносителя), применением оборотного песка с сажистыми остатками продуктов газификации моделей при ЛГМ, заменой кварцевого песка на стальную дробь, предварительным охлаждением наполнителя в морозильной камере. П. 15 и 18 (табл. 1) соответствуют охлаждению образца, установленного на шамотный кирпич, в пустом контейнере с крышкой и без крышки только под влиянием окружающего воздуха.

По данным табл. 1, увеличение скорости охлаждения произошло более чем в 2 раза, по данным табл. 2 – почти в 1,6 раза. Эксперименты охлаждения в кварцевом песке с высыпанием через отверстие в контейнере (табл. 2, п. 5) выполнены с целью дальнейшего применения для контейнеров с донной разгрузкой [2]. В нижней части таких контейнеров установлен затвор для их опустошения без опрокидывания. В экспериментах после заливки формы и затвердевания отливки через отверстие диаметром 15 мм (ранее закрытое пробкой) в низу контейнера песок из формы высыпался в нижестоящий короб, как в песочных часах. Медленное опускание отливки на дно контейнера в среде обтекающего ее песка с дальнейшим охлаждением на воздухе сочетает операции охлаждения отливки в форме и выбивки самопроизвольным удалением песка через дозирующее отверстие в контейнере [3].

Также было определено влияние динамического перемещения сухого несвязанного песка вокруг отливки на скорость ее охлаждения. Для этого 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 воздухом. Интенсификация теплообмена между отливкой и формой в таком варианте 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, были исследованы другие спо-

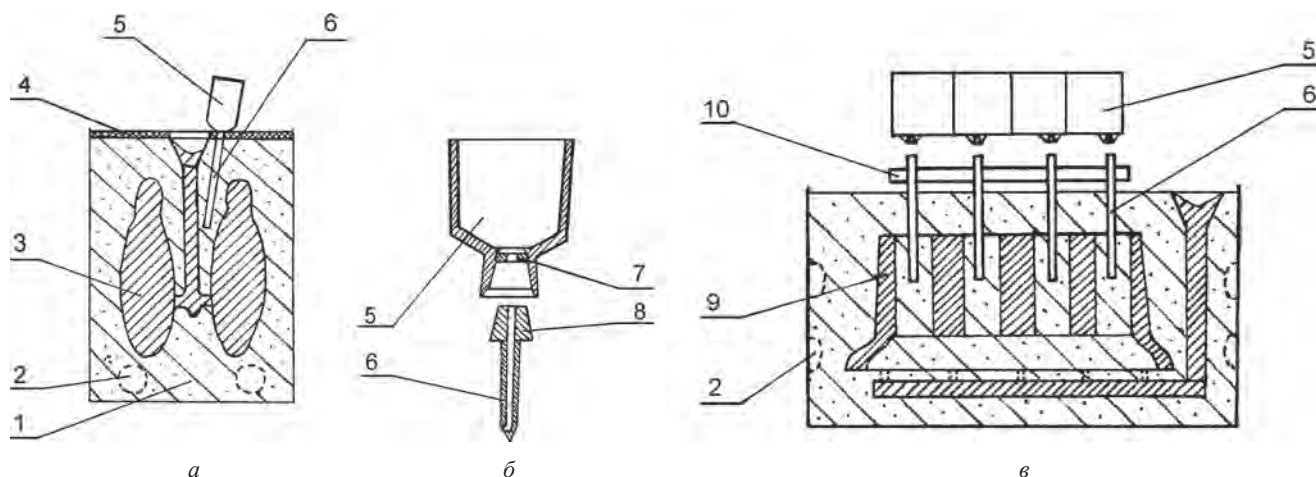


Рис. 1. Вакуулируемые формы с дозаторами воды: контейнерная форма с дозатором воды (а); разборная емкость-дозатор (б); форма с отливкой типа блока цилиндров (в): 1 – песок; 2 – фильтры; 3 – отливка; 4 – пленка; 5 – емкость-дозатор; 6 – трубчатый штырь; 7 – дозирующая шайба; 8 – конусная пробка; 9 – отливка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

собы регулирования теплообмена отливки с формой при ЛГМ. Разработали переносные емкости-дозаторы с отъемными трубками для подачи хладагента в форму [4]. 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, вакуулируемый 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 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 тому, что увлажняют контактирующие избирательными поверхностями отливки объемы песка, а другие зоны отливки остывают в обычном режиме. Такого рода форма служит для получения отливки с регулируемыми дифференцированными свойствами.

Для отливки блока цилиндров двигателя внутреннего сгорания и других отливок с трущимися поверхностями (поршней о цилиндры) избирательным охлаждением внутренней поверхности цилиндра можно повысить твердость этой поверхности до 250–280 НВ, а на остальных частях отливки получить твердость ниже, оптимальную для механической обработки на обрабатывающих центрах без лишнего износа режущего инструмента.

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 снижается в несколько раз ( $\epsilon \sim 140$  до  $\sim 35$  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 объемы песка, устремляется к более сухим 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 близ 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  $\lambda$  песка в смесях с водой, значение  $\lambda$  растет с увеличением относительной влажности  $W$ , однако при  $W > 8\%$  наблюдается снижение  $\lambda$  у смеси объемного веса  $1470 \text{ кг/м}^3$  [5]. Эти данные взяли за основу для ускоренного охлаждения со стороны отдельных поверхностей отливки для повышения их твердости при том, что вся отливка охлаждается по традиционному режиму [6]. Для отливки корпуса 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. Однако подача в песок внутрь цилиндра корпуса излишнего количества влаги как хладагента обычно приводит к накоплению ее в нежелательных местах формы и может в той зоне повысить твердость отливки, что увеличит затраты на механообработку, а также может переувлажнить отдельные зоны песка и затруднить его высыпку.

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 объеме песка до нагрева их выше температуры кипения воды обеспечивает спокойное ее впитывание без образования пара, который быстро распространится в глубь формы. Поэтому удобно подавать воду в песок сразу после заливки металлом, а скорость впитывания регулировать величиной разрежения или диаметром отверстий трубчатых штырей. В ускоренно охлаждаемых местах в структуре чугуна увеличивается количество связанного углерода и перлита, что повышает твердость металла по сравнению с чугуном, контактирующим 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 [7]. 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 по принципу, подобному работе бытового пылесоса, 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 эвтектоидного превращения.

Применение этого способа опять же показано 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

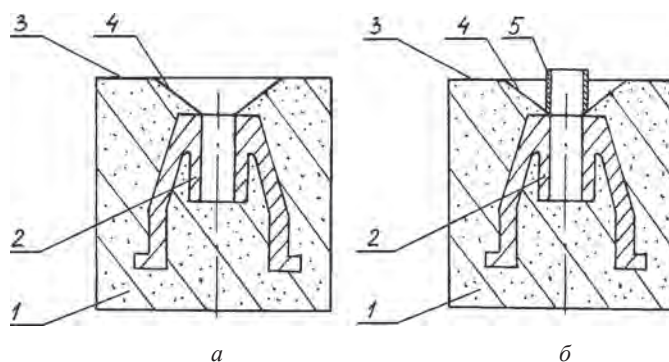


Рис. 2. Литейная форма: в разрезе по оси цилиндра отливки (а); то же с патрубком, установленном на отливке (б): 1 – песок; 2 – цилиндр (гильза) отливки блока цилиндров; 3 – контрлад; 4 – естественный откос песка; 5 – патрубок

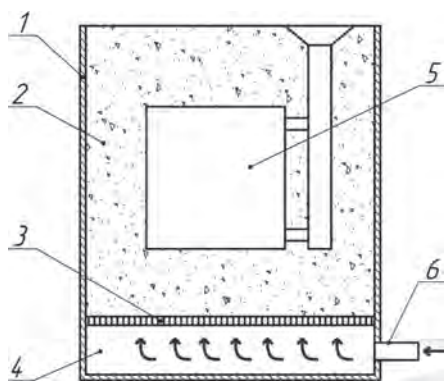


Рис. 3. Схема охлаждения отливки в контейнере: 1 – контейнер; 2 – песок; 3 – перфорированное дно; 4 – полость; 5 – отливка; 6 – штуцер

бок 5, верхнее отверстие которого могут частично закрывать съемной крышкой, регулируя конвективное движение воздуха.

**Применение аэродинамического перемещения огнеупорного наполнителя для повышения свойств отливок.** Особенность ЛГМ, заключающаяся в использовании сухого песка без связующего, позволяет существенно 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 массе, а насыпной слой ФМ перейдет в псевдооживленное состояние. Поскольку насыпной слой ФМ является, по сути, теплоизолятором, а псевдооживленный слой ФМ имеет высокую теплопроводность, способную превысить теплопроводность металлов [8], то эти преимущества были использованы при разработке

нового способа управления теплообменом в литейной форме.

Реализация предлагаемого способа для ЛГМ возможна следующим образом [9]. В контейнере 1 (рис. 3) формируют газифицируемую модель, засыпав сухой песок 2 на пористое (перфорированное) дно 3, и вакуумируют форму через полость 4. После заливки расплава в форму от штуцера 6 контейнера отключают вакуум. Вместо вакуума к штуцеру 6 подключают сжатый воздух, и, регулируя расход воздуха, создают псевдооживленный слой песка в контейнере. Охлаждение отливки 5 таким образом ведут до необходимой температуры отливки или по заданному режиму.

Нами были 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 псевдооживленном слое песка скорость охлаждения отливки – 1,7–2,9 °С/с, т. е. в 22–28 раз выше. Это говорит о том, что аэродинамическое перемещение ФМ в контейнере позволяет существенно интенсифицировать процесс теплообмена отливки с частицами ФМ.

Последующей задачей было определение влияния аэродинамического перемещения ФМ на формирование механических свойств отливок из алюминиевых сплавов, поскольку за счет увеличения скорости кристаллизации и охлаждения отливки можно значительно повысить свойства алюминиевых сплавов. Для этого на экспериментальной базе ФТИМС НАН Украины по технологии литья по газифицируемым моделям с аэродинамическим перемещением ФМ в контейнере были изготовлены партии отливок «Корпус тормозного крана», «Уголок» и «Крышка» из сплавов АК9, АК5М2 и АК7 ДСТУ 2839-94 соответственно. Данные отливки были изготовлены по базовой (традиционной) технологии ЛГМ, т. е. без применения каких-либо воздействий, а также по новой технологии ЛГМ с аэродинамическим перемещением ФМ. Последняя технологическая схема предполагала, что после заливки расплава в вакуумируемую форму его 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 на протяжении 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) (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Механические свойства 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

Марка сплава	Способ литья	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость по Бринеллю НВ
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

В результате механических испытаний было установлено, что предел прочности и пластичность алюминиевых сплавов АК9, АК5М2 и АК7 в отливках, которые во время их затвердевания и охлаждения в форме из кварцевого песка 2К<sub>2</sub>О<sub>2</sub>016 ГОСТ 2138-91 подвергали 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 ЛГМ технологии. Также наблюдается 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 формовочного материала 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, которое может использоваться как для обеспечения необходимого уровня механических свойств, так и для повышения производительности производства. Основным отличием первой технологической схемы от обычного технологического 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 нашим экспериментальным данным, можно уменьшить в 10–12 раз.

Рассмотренные результаты исследований, а также способы формовки и охлаждения отливки в песчаной форме раскрывают обширные возможности вакуумируемых форм (рис. 4). Приведенные на рисунке способы использования газового избыточного давления описаны в [10], получения ячеисто-каркасных отливок – в [11], а охлаждения отливок в псевдооживленном слое песка – в [12].

Способы ускоренного охлаждения отливки, рассмотренные в настоящей статье и отражающие наиболее технологичные решения на основе проведенных экспериментов, раскрывают потенциал вакуумируемых песчаных форм для регулирования теплообмена между отливкой и литейной формой. Интенсификация теплообмена при затвердевании и охлаждении отливок позволяет повысить их механические



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



свойства, что дает возможность уменьшить толщину стенки литой заготовки, что, в свою очередь, приведет к уменьшению массы детали и увеличению экономии.

### Литература

1. 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.
2. Дорошенко В. С., Бердыев К. Х. Современные тенденции конструирования опочной оснастки для ЛГМ // Металл и литье Украины. 2011. № 4. С. 24–29.
3. Дорошенко В. С. Регулирование охлаждения отливки в вакуумируемой форме фильтрацией хладагентов и движением частиц песка // Литейное производство. 2013. № 10. С. 32–37.
4. Пат. Украины 80928, МПК В22С 9/02. Литейная форма для вакуумной формовки / О. И. Шинский, В. С. Дорошенко и др. Опубл. 2007. Бюл. № 18.
5. Носков Б. А., Яновер Я. Д. Исследование теплофизических характеристик формовочных материалов методами регулярного режима // Изв. вузов. 1971. № 11. С. 147–151.
6. Пат. Украины 85516, МПК В22С 9/02, В22D 27/04. Способ изготовления отливки корпуса блока цилиндров / О. И. Шинский, В. С. Дорошенко и др. Опубл. 2009, Бюл. № 2.
7. Пат. Украины 82963, МПК В22D27/04, В22D27/15. Способ изготовления отливки в песчаной форме с регулируемым охлаждением отдельных ее частей / О. И. Шинский, В. С. Дорошенко, С. И. Клименко. Опубл. 2008. Бюл. № 6.
8. Заваров А. С., Баскаков А. П., Грачев С. В. Термическая обработка в кипящем слое. М.: Metallurgiya, 1981. 84 с.
9. Пат. Украины 97151, МПК В22D 27/04. Способ охлаждения отливок в литейной форме / П. Б. Калюжный, А. Н. Голофаев, Ю. И. Гутько. Опубл. 2015. Бюл. № 5.
10. Дорошенко В. С. Литье по газифицируемым моделям с кристаллизацией металла под давлением // Литейное производство. 2016. № 1. С. 25–28.
11. Дорошенко В. С. Способы получения каркасных и ячеистых литых материалов и деталей по газифицируемым моделям // Литейное производство. 2008. № 9. С. 28–32.
12. 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. Shinskiy O. I., Doroshenko V. S., Kravchenko V. P. Intensifikacija teploobmena otlivki s dispersnym napolnitelem litejnoj formy pri primenenii hladagenta i vynuzhdennoj konvekci [Intensification of the casting heat exchange with the disperse filler of the mold using refrigerant and forced convection]. *Processy lit'ja = Casting Processes*, 2009, no. 5, pp. 74–82.
2. Doroshenko V. S., Berdyev K. H. Sovremennye tendencii konstruirovaniya opochnoj osnastki dlja LGM [Modern trends in design of flask equipment for lost foam casting]. *Metall i lit'e Ukrainy = Metal and Casting of Ukraine*, 2011, no. 4, pp. 24–29.
3. Doroshenko V. S. Regulirovanie ohlazhdenija 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 = Foudry*, 2013, no. 10, pp. 32–37.
4. Shinskiy O. I., Doroshenko V. S. and etc. *Litejnaja forma dlja vakuumnoj formovki* [The mold for vacuum forming]. Patent UA, no. 80928, 2007.
5. Noskov B. A., Janover Ja. D. Issledovanie tepl'ofizicheskikh harakteristik formovochnyh materialov metodami reguljarnogo rezhima [Investigation of thermophysical characteristics of molding materials by regular-mode methods]. *Izvestija vuzov = Universities news*, 1971, no. 11, pp. 147–151.
6. Shinskiy O. I., Doroshenko V. S. and etc. *Sposob izgotovlenija otlivki korpusa bloka cilindrov* [The method for manufacturing the casting of the cylinder block body]. Patent UA, no. 85516, 2009.
7. Shinskiy O. I., Doroshenko V. S., Klimenko S. I. *Sposob izgotovlenija otlivki v peschanoj forme s reguliruemym 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, 2008.
8. Zavarov A. S., Baskakov A. P., Grachev S. V. *Termicheskaja obrabotka v kipjashhem sloe* [Heat treatment in fluidized bed]. Moscow, Metallurgija Publ., 1981, 84 p.
9. Kalyuzhnyy P. B., Golofaev A. N., Gut'ko Ju. I. *Sposob ohlazhdenija otlivok v litejnoj forme* [Method of castings cooling in a mold]. Patent UA, no. 97151, 2015.
10. Doroshenko V. S. Lit'e po gazificiruемым modeljam s kristallizaciej metalla pod davleniem [Lost foam casting with metal crystallization under pressure]. *Litejnoe proizvodstvo = Foudry*, 2016, no. 1, pp. 25–28.
11. Doroshenko V. S. 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 = Foudry*, 2008, no. 9, pp. 28–32.
12. Doroshenko V. S., Klimenko S. I., Kalyuzhnyy P. B. Intensifikacija teplootvoda pri ohlazhdenii otlivok v litejnoj forme s sy-puchim napolnitelem metodom ego psevdoozhivlenija [The intensification of the heat removal with cooling castings in a mold with particulate filler by its fluidization]. *Metall i lit'e Ukrainy = Metal and Casting of Ukraine*, 2016, no. 6, pp. 22–26.