

**В. С. Дорошенко, С. И. Клименко, П. Б. Калюжный\***

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

\*Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, Северодонецк

## Интенсификация теплоотвода при охлаждении отливок в литейной форме с сыпучим наполнителем методом его псевдооживления

*Рассмотрены технические решения по ускоренному охлаждению отливок путём создания псевдооживленного слоя частиц наполнителя в песчаных формах; предложен вариант совмещения этого метода охлаждения с последующим удалением из форм сыпучего наполнителя с использованием вакуумных систем литейных участков.*

**Ключевые слова:** охлаждение отливок, затвердевание металла, литьё по газифицируемым моделям, вакуумная формовка, псевдооживление, теплообмен, песчаная форма

Удовлетворить требование получения отливок с заданными структурой и свойствами можно, лишь научившись управлять интенсивностью теплоотвода от затвердевающей отливки [1]. Поскольку традиционные методы формообразования отливки сопровождаются формой в течение всего цикла производства (от заливки расплава до полного охлаждения), то способы управления теплоотводом сводятся к изменению теплофизических свойств формы, либо к принудительному охлаждению. Но при варьировании таких свойств и принудительного охлаждения скорость затвердевания и охлаждения отливки из-за образования зазора можно изменить в относительно небольших пределах: для формы песчаной – на 10 %, из специальных огнеупоров или металлической дробы – на 50 %, металлической, в том числе охлаждаемой, – в 2-4 раза [1]. Если ещё учесть, что интенсивность теплоотвода по ходу охлаждения монотонно уменьшается (а условия структурообразования часто требуют циклического или даже знакопеременного теплоотвода), то становится ясно, что в рамках традиционных методов формообразования получить отливки с заданными структурой и свойствами весьма затруднительно. Наиболее близки к реализации управления в широком интервале теплоотводом методы, основанные на физических способах упрочнения песчаной формы: разновидности ЛГМ-процесса, литьё в вакуумируемые, магнитные и замороженные формы. Однако ни один из них в отдельности не решает всей проблемы, и каждый имеет существенные недостатки. Напрашивается мысль о синтезировании различных физических воздействий в процессах формообразования для создания высокоэффективных методов литья.

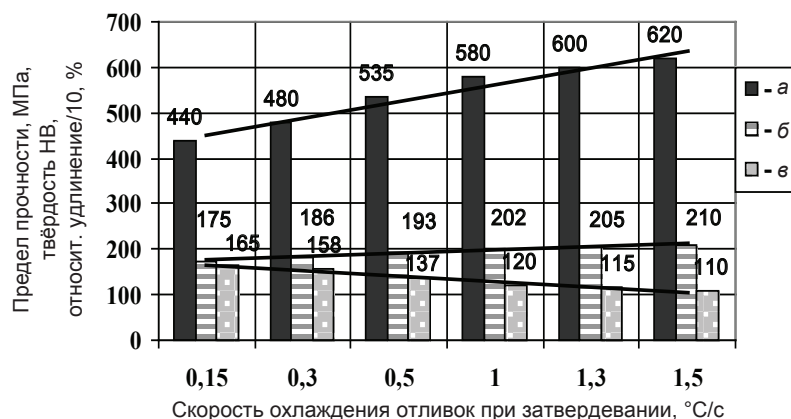
Отсюда среди направлений исследования процессов формообразования сохраняет актуальность изучение условий формирования качества отливок с использованием процессов тепломассопереноса в поле сил управляемого физического воздействия, включая создание градиентов, прежде всего, давления, концентрации и температуры при создании на их основе новых экологически чистых ресурсосберегаю-

щих технологий. В частности, настоящая статья посвящена рассмотрению интенсификации теплоотвода от отливки в литейной форме с сыпучим наполнителем методом псевдооживления этого наполнителя. Проведён ряд экспериментов при научном консультировании проф. О. И. Шинского [2, 3]. Полученные данные показывают возможность увеличения скорости охлаждения поверхности нагретого металлического образца методом псевдооживления песка в несколько десятков раз за первые 120 с (период по времени близкий к затвердеванию отливки) по сравнению с охлаждением такого образца в форме с неподвижным сухим (свежим или оборотным) кварцевым песком.

Влияние увеличения скорости охлаждения в период затвердевания металла показано на примере изменения механических свойств отливок из высокопрочного чугуна (ВЧ). Для оценки качества такого влияния применены методы расчёта и математические модели прогнозирования свойств ВЧ, разработанные под научным руководством д. т. н. В. Б. Бубликова в ФТИМС НАН Украины. Результаты расчётов в графической интерпретации приведены из работы [4] на рисунке. Согласно этим данным, при интенсификации теплоотвода рост скорости охлаждения с 0,15 до 1,5 °C/с в период затвердевания отливок в песчаных формах изменяет предела прочности  $\sigma_b$  металла в диапазоне 440-620 МПа. Твёрдость по Бринелю (НВ) отливок из ВЧ в исследуемом диапазоне увеличилась с 175 до 210 НВ, соответственно снизилась пластичность металла.

Такое изменение свойств металла получено в результате интенсификации конвективной составляющей теплоотвода путём подачи газообразного или жидкого хладагента в песок формы или организации движения песка вокруг отливки [4]. Указанные способы наиболее приемлемы для форм из сыпучего огнеупорного наполнителя, изготовленных по разновидностям вакуумной формовки, включая ЛГМ-процесс, а также при литье в оболочковых формах, заливаемых в контейнере с сыпучим наполнителем.

Также известен способ охлаждения отливок в литейной форме или контейнере, которые изготавливают



Влияние интенсивности теплообмена на границе металл-форма на прочность (а), твёрдость (б) и пластичность высокопрочного чугуна (в) [4]

по ЛГМ-процессу [5]. После заливки в форму жидкого металла контейнер устанавливают на стенд охлаждения и продувают сжатым воздухом. Охлаждение отливок выполняют непосредственно в литейной форме или контейнере вместе с огнеупорным сыпучим наполнителем. Однако продувка формы с отливкой сжатым воздухом не слишком эффективна, поскольку слой огнеупорного наполнителя, прилегающей к отливке, прогревается гораздо больше, чем наполнитель у стенок формы. И воздух, который проходит через непрогретые зоны формы, не выполняет заданной функции интенсивно отбирать тепло, прежде всего от отливки. Такое охлаждение проходит весьма продолжительно, требует специального стенда, а также транспортных операций для установления и снятия форм на стенд и с него для дальнейшего охлаждения отливок. Не используется возможность создания подвижной дисперсной среды из сыпучего наполнителя для интенсификации конвективной составляющей теплопереноса.

В процессе выбора оптимального способа псевдооживления песка в форме рассмотрено техническое решение [6]. Этот способ сокращает время охлаждения отливок в форме за счёт создания псевдооживленного слоя наполнителя, а также совмещения операций охлаждения отливки и сыпучего огнеупорного наполнителя. Однако этот способ также требует специального стенда, а также транспортных операций для установления и снятия с него форм с последующей перевозкой их для дальнейшего охлаждения отливок. Для одновременного охлаждения нескольких форм такой стенд будет представлять сложную энергоёмкую конструкцию высокой стоимости с мощными средствами вентиляции и улавливания песка для предотвращения выдувания его из форм и запыления воздуха литейного цеха.

Сочетание физического и математического моделирования с последующей проверкой на натуральных объектах закономерностей создания и поддержания псевдооживленного слоя [2, 3, 6, 7] свидетельствует о том, что порозность  $\varepsilon$  уплотнённого песка литейной формы составляет около 0,35-0,36, а стабильного псевдооживленного слоя – 0,50-0,75. То есть объём песчаного наполнителя литейной

формы или заполненного песком контейнера с отливками при псевдооживлении увеличится примерно на 20-40 %, и часть песка вылетит из формы, что приведёт к его потере и запыленности литейного цеха. Поэтому реально выполнить псевдооживления песчаного наполнителя непосредственно в форме, согласно описанию указанного патента [6], можно только отобрав из формы указанную часть наполнителя. Это трудно выполнить из-за горячего песка вокруг отливки, кроме того, мелкая фракция песка и лёгких примесей будет склонна к пылению из формы из-за свойственной ей

невысокой скорости витания (уноса).

С целью создания и применения способа эффективного (форсированного) охлаждения отливки в псевдооживленном слое непосредственно в форме или контейнере при уменьшении экономических затрат и повышении экологической безопасности производства разработан ряд новых технических решений согласно способу охлаждения отливки [8]. Суть этих решений состоит в том, что для создания в форме или контейнере псевдооживленного слоя сыпучего наполнителя путём равномерной продувки воздухом или газом этого наполнителя в вертикальном направлении, перед продувкой воздухом или газом на литейную форму или контейнер, устанавливают коробчатый экран. Охлаждение отливок проводят на заливочном плацу или конвейере без перевозки на специальный стенд.

После заливки опочной или контейнерной песчаной формы металлом на её верхней контрклад устанавливается коробчатый (рамочный) экран с верхним отверстием, таким образом наращивают стенки формы до высоты, которая больше высоты псевдооживленного слоя, созданного непосредственно из наполнителя литейной формы. Это предотвращает вынос песка и запыление воздуха цеха вредными для здоровья человека пылевидными частицами наполнителя с достаточно жёсткими ограничениями по допустимому его содержанию в рабочей зоне цеха (например, кварцевой пыли). Охлаждение до заданной температуры отливки или по разработанному температурному режиму эффективно по продолжительности от нескольких до десятков минут и дольше. Оно может быть циклическим и выполняться по специальной программе как совмещение литейного процесса с термообработкой отливки непосредственно в песчаной форме.

Кроме того, на верхнюю часть коробчатого экрана или небольшого отверстия в нём предложено устанавливать или монтировать сетку. Установление или монтаж на верхнем торце экрана сетки, не пропускающей пылевидные частицы, а пропускающей только поток газа, в значительной степени гарантирует предотвращение выноса пыли и потерю сыпучего наполнителя.

Также в качестве коробчатого экрана на литейную форму или контейнер предложено устанавливать вверх дном пустой контейнер со средствами вакуумирования и через эти средства вакуумирования удалять воздух или газ после продувки, а также, как вариант, предложено этот пустой контейнер вакуумировать. Таким образом, контейнер для формовки использовали в качестве экрана, обеспечив свободный выход из него отработанного газа и (или) удаление этого газа путём отсоса через вакуум-фильтры, традиционно установленные в контейнере или опоке для вакуумирования песчаной формы.

Устанавливали такой контейнер вверх дном на литейную форму или первый контейнер, содержащий сыпучий наполнитель с затвердевающими после заливки отливками. И при создании псевдооживленного слоя наполнителя через его средства вакуумирования удаляли воздух из верхней зоны псевдооживленного слоя за пределы этого пустого контейнера через открытые отверстия указанных средств. Или этот пустой контейнер вакуумировали путём подключения его фильтров для вакуумирования через трубопроводы к вакуумному насосу, который обычно используется для вакуумирования песчаных форм.

Для таких контейнеров средства вакуумирования чаще всего выполняют в виде сетчатых фильтров или металлорукавов [9]. Подбирали верхний контейнер со средствами вакуумирования достаточной пропускной способности, гибкие фильтры можно размещать в придонной части контейнера, загерметизировав плёнкой те их части, которые не применяют для отсоса отходящих газов. Последняя операция предотвращает попадание газа с пылью за пределы формы с экраном, создаёт полностью изолированный объём и позволяет использовать свободные от формовки контейнеры без затрат на новую оснастку. Создаётся возможность одновременного ускоренного охлаждения многих форм без применения стендов, и непосредственно на месте заливки форм без дополнительной их транспортировки краном или другим транспортом.

Чтобы отливка при охлаждении не опустилась на дно формы, её удерживают на специальных опорах снизу (шамотный кирпич) или закрепляют (подвешивают) за литниковую систему. Кроме использования пустых контейнеров, для изготовления экранов возможно применение тонкостенной жести. Для уплотнения стыка экрана с формой применяют несложное уплотнение, ленты резины по стыку или плотное помещение экрана в проём формовочной оснастки по внутреннему периметру, и тому подобное. Возможно по периметру экрана крепление гибкой ленты, которую прижимает к стенке формы действие создаваемого в экране разрежения.

Применение экрана на месте заливки металлом формы без транспортировки её к стенду позволяет по времени приблизить начало интенсивного охлаждения отливки к процессу её затвердевания, что расширяет диапазон возможностей термической обработки отливки непосредственно в песчаной форме с формированием заданной структуры металла. Такой экран позволяет задействовать весь объём

песка формы для принудительной конвекции такой твёрдой дисперсной фазы в дисперсионной газовой среде, продуваемой через формовочную оснастку и коробчатый экран, без необходимости отбора песка из формы, при этом не уменьшая массы песка. При этом минимизируются потери наполнителя, обеспечивается практически полный возврат его в многократный оборотный цикл формовки, вместе с экологическими преимуществами (без затрат на вытяжную вентиляцию и очистку воздуха), а также без ухудшения условий труда и без дорогостоящего оборудования стенов предложенный процесс способствует уменьшению экономических затрат и повышению экологической безопасности производства.

Способ пригоден для всех форм с сыпучим наполнителем, в которых возможно создание подвижной твёрдо-газовой дисперсной системы, как средства переноса масс в объёмном движении – конвекционном теплообмене между отливкой наполнителем и газом, для вакуумной формовки и ЛГМ, а также для контейнеров с тонкостенными оболочковыми формами (выполненным по легкоплавким моделям), между которыми засыпан сыпучий наполнитель. Горячие отливки в оболочковых формах (например, гипсопесчаных) при быстром охлаждении частично или полностью теряют остатки оболочки. Также оболочки разрушаются под действием ударов подвижных частиц наполнителя, и песчинки из разрушенной оболочки включаются в движение. Подвижная песчаная среда действует на поверхность отливки подобно обработке песчаной струей, снижая продолжительность последующей очистки отливки, а трение нагретых песчинок между собой создаёт эффект термически-механической регенерации наполнителя, что ведёт к экономии на очистных и регенерационных операциях.

Кроме того, зёрна кварцевого песка, находящиеся в непосредственной близости к поверхности отливки в неподвижном песке, при заливке металла нагреваются до высоких температур (особенно при литье железоуглеродистых сплавов), в результате такого термоудара (thermal shock) высока вероятность их растрескивания и разрушения. Создание в объёме литейной формы перемешивания огнеупорного наполнителя за счёт его псевдооживления [8] сгладит этот эффект, что позволит сократить безвозвратные потери огнеупорного наполнителя и снизить долю свежего песка, вносимого для освежения формовочного материала, как правило, на 95-97 % находящегося в постоянном обороте в рассматриваемых способах формовки.

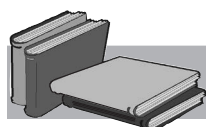
По аналогии со способом охлаждения отливки с удалением песка с части её поверхности [10], в котором эта часть песка удаляется из рассматриваемых литейных форм путём отсасывания с применением вакуума, рассматривали возможность перевода операции псевдооживления в последующую операцию транспортирования песка в пневмопотоке для опустошения форм. Скорость газового потока, при которой гидродинамическое давление, создаваемое на поверхности единичной твёрдой частицы, становится равным её весу, называется скоростью

витания. Когда скорость потока превысит скорость витания, начинается совместное восходящее движение газового потока и твёрдой частицы. При достижении порозности слоя  $\varepsilon \approx 1$  частицы уносятся из полости оснастки литейной формы [7].

На литейных участках (с вакуумной формовкой) для транспортирования сухого песка в пневмопотоке часто используют вакуумирование (реже применяют сжатый воздух) при подключении системы трубопроводов к вакуумной системе участка, описанной в работе [11] и представляющий связанный трубопроводами комплекс оборудования с вакуумными насосами, аккумуляторами, очистителями воздуха и трубопроводной арматурой. При этом удалить песок из формы и подать его в систему охлаждения и регенерации песка, примеры комплектации которой описаны в работе [12], – вполне решаемая задача для конструкторов путём создания пневмопотока из-под

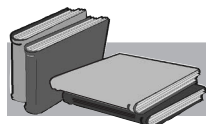
рассмотренного выше коробчатого экрана в такую систему охлаждения и регенерации при использовании централизованной вакуумной системы действующих или проектируемых литейных участков. Такое решение совместит интенсивное охлаждение отливки в форме и опустошение форм прямо с формовочно-заливочного участка, после чего отливки продолжают охлаждаться на опорах в пустой опочной оснастке, подвергаясь воздействию воздуха при естественной конвекции или при продувке воздуха или газа.

Таким образом, в статье рассмотрены технические решения по ускоренному охлаждению отливок путём создания псевдооживленного слоя частиц наполнителя в песчаных формах; предложен вариант совмещения этого метода охлаждения с последующим удалением из форм сыпучего наполнителя с использованием вакуумных систем литейных участков.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Найдек В. Л. Создание технологий и материалов на основе фундаментальных научных исследований // Литейное производство. – 1991. – № 3. – С. 2-4.
2. Калюжный П. Б., Шалевская И. А., Яковышин О. А. Исследование метода управления процессом кристаллизации в вакуумируемых формах // Металл и литье Украины. – 2015. – №8. – С. 24-27.
3. Калюжный П. Б., Шалевская И. А. Управление затвердеванием и охлаждением отливок в формах из кварцевого песка за счет его псевдооживления // Процессы литья. – 2015. – №6. – С. 31-34.
4. Клименко С. І. Технологія виробництва виливків головок і блоків циліндрів двигунів із сірого та високоміцного чавуну за моделями, що газифікуються, з примусовим охолодженням форми холодоагентами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.04. – К., 2015. – 23 с.
5. Патент Украины № 43694, МПК В22D27/04. Способ охлаждения отливок в литейной форме, контейнере / И. О. Шинский, О. И. Шинский, П. М. Каричковский и др; опубл. 2009, Бюл. № 16.
6. Патент Украины № 97151, МПК В22D27/04. Способ охлаждения отливок в литейной форме / П. Б. Калюжный, А. М. Голофаев, Ю. И. Гутько; опубл. 2015, Бюл. № 5.
7. Овчинников Н. Л., Овчинников Л. Н., Натарева С. В. Сушка и обжиг в кипящем слое. ГОУВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново. – 2009. – 106 с.
8. Патент Украины № 106005, МПК В22D 27/04. Способ охлаждения отливок в литейной форме или контейнере с сыпучим наполнителем / В. С. Дорошенко, П. Б. Калюжный; опубл. 2016, Бюл. № 7.
9. Дорошенко В. С., Бердыев К. Х. Современные тенденции конструирования опочной оснастки для ЛГМ // Металл и литье Украины. – 2011. – № 4. – С. 24 –29.
10. Патент 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.
11. Дорошенко В. С., Шинский В. О. Вакуумирование песчаной формы при литье по газифицируемым моделям // Литейное производство. – 2014. – № 8. – С. 33-38.
12. Бердыев К. Х., Дорошенко В. С. Оборудование непрерывного действия для переработки сыпучих материалов в литейном производстве и горнорудной промышленности // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – № 2. – С. 30-33.



## REFERENCES

1. Naidek V. L. (1991). Sozdaniie tekhnologii i materialov na osnove fundamental'nykh nauchnykh issledovaniy [Creation of technologies and materials based on fundamental scientific research]. Liteinoie proizvodstvo, № 3, pp. 2-4. [in Russian].
2. Kaliuzhnyi P. B., Shalevskaia I. A., Yakovyshin O. A. (2015). Issledovaniie metoda upravleniia protsessom kristallizatsii v vakuumiruiemykh formakh [Research management method of crystallization process in the evacuated molds]. Metall i lit'e Ukrainy, № 8, pp. 24-27. [in Russian].
3. Kaliuzhnyi P. B., Shalevskaia I. A. (2015). Upravleniie zatverdevaniem i okhlazhdeniim otlivok v formakh iz kvartsevogo peska za shchet yego psevdoozhizheniia [Management solidification and cooling of castings in the molds of quartz sand due to its fluidization]. Processy lit'ya, № 6, pp. 31-34. [in Russian].
4. Klymenko S. I. (2015). Tekhnolohiia vyrobnytstva vylivkiv holovok i blokiv tsylindriv dvyhuniv iz siroho ta vysokomitsnoho chavunu za modelyamy, shcho hazyfikuiut'sia, z prymusovym okholodzhennyam formy kholodoahentamy [Technology of casting cylinder heads and engine blocks of gray and ductile iron by the patterns that gasification with forced cooling molds of refrigerants]. Extended abstract of candidate's thesis: 05.16.04. Kyiv. [in Ukrainian].

5. Patent of Ukraine № 43694, MPK B22D27/04. Sposob ohlazhdeniia otlivok v liteinoi forme, konteinere [A method of cooling of castings in the mold, container]. Shinskii I. O., Shinskii O. I., Karichkovskii P. M. et al. Publ. 2009, Bull. № 16. [in Russian].
6. Patent of Ukraine № 97151, MPK B22D27/04. Sposob ohlazhdeniya otlivok v liteinoi forme [A method of cooling a mold castings] / Kalyuzhnyi P. B., Golofaiev A. M., Gut'ko Yu. I. Publ. 2015, Bull. № 5. [in Russian].
7. Ovchinnikov N. L., Ovchinnikov L. N., Natariyev S. V. (2009). Sushka i obzhig v kipiashchem sloie [Drying and calcination in a fluidized bed]. GOUVPO Ivan. gos. him.-tekhno. un-t. Ivanovo. [in Russian].
8. Patent of Ukraine № 106005, MPK V22D 27/04. Sposob ohlazhdeniia otlivok v liteinoi forme ili konteinere s sypuchim napolnitelem [A method of cooling casting in a mold or container filled with loose]. Doroshenko V. S., P. B. Kaliuzhnyi. Publ. 2016, Bull. № 7. [in Russian].
9. Doroshenko V. S., Berdyev K. H. (2011). Sovremennye tendentsii konstruirovaniia opochnoi osnastki dlya LGM [Modern trends in designing tooling for Lost Foam Casting flask]. Metall i lit'e Ukrainy, № 4, pp. 24-29. [in Russian].
10. Patent of Ukraine № 82963, MPK V22D27/04, V22D27/15. Sposob izgotovleniia otlivki v peschanoi forme s reguliruiemym ohlazhdeniemy ot del'nykh yeie chastei [A method of manufacturing a casting sand mold with controlled cooling of its individual parts]. Shinskii O. I., Doroshenko V. S., Klimenko S. I. Publ. 2008, Bull. № 6. [in Russian].
11. Doroshenko V. S., SHinskii V. O. (2014). Vakuumirovaniie peshchanoi formy pri lit'e po gazificiruiemym modeliam [Evacuation sand mold for casting on gasified patterns]. Liteinoie proizvodstvo, № 8, pp. 33-38. [in Russian].
12. Berdyev K. H., Doroshenko V. S. (2011). Oborudovaniie nepreryvnogo deistviia dlia pererabotki sypuchikh materialov v liteinom proizvodstve i gornorudnoi promyshlennosti [Continuous Equipment for processing of bulk materials in the foundry industry and the mining industry]. Bezopasnost' truda v promyshlennosti, № 2, pp. 30-33. [in Russian].

### Анотація

*Дорошенко В. С., Клименко С. І., Калюжний П. Б.*

**Інтенсифікація тепловідведення при охолодженні виливків в ливарній формі з сипким наповнювачем методом його псевдозрідження**

*Розглянуто технічні рішення щодо прискореного охолодження виливків шляхом створення псевдозрідженого шару частинок наповнювача в піщаних формах; запропоновано варіант поєднання цього методу охолодження з подальшим видаленням з форм сипкого наповнювача з використанням вакуумних систем ливарних дільниць.*

### Ключові слова

*охолодження виливків, затвердіння металу, лиття по моделях, що газифікуються, вакуумна формовка, псевдозрідження, теплообмін, піщана форма*

### Summary

*Doroshenko V., Klimenko S., Kalyuzhny P.*

**The intensification of the heat sink by castings solidification in a mold with bulk by method of its fluidization**

*There are considered technical solutions to accelerate solidification of the castings by creating a fluidized layer of bulk particles in sand molds and it also offered to combine this solidification method with followed removal of bulk out of molds, and with using vacuum systems of foundry shops.*

### Keywords

*cooling of castings, solidification of a metal, Lost Foam Casting, vacuum molding, fluidization, heat exchange, sand mold*

Поступила 07.07.2016