

УДК 621.744

В. С. Дорошенко, О. И. Шинский, В. П. Кравченко

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОБМЕНА ОТЛИВКИ С ДИСПЕРСНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ХЛАДАГЕНТА И ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

Получено выражение для коэффициента теплоотдачи α , что позволило по кривым охлаждения отливки в песчаной форме определить ряд численных его значений, соответствующих различным вариантам принудительной конвекции, в частности, при увлажнении формы в разной степени, а также обрушении и гравитационном течении формовочного песка вокруг отливки. Построены графики тепловых потоков, значения α , скорости охлаждения цилиндрической чугунной отливки в зависимости от времени охлаждения.

Отримано вираз для коефіцієнта тепловіддачі α , що дозволило по кривих охолодження виливка в піщаній формі визначити ряд його чисельних значень, які відповідають різним варіантам примусової конвекції, зокрема, при різній зволоженості форми, а також при обваленні і гравітаційному перебігу формувального піску довкола виливка. Побудовано графіки теплових потоків, значення α , швидкості охолодження циліндрового чавунного виливка залежно від часу охолодження.

Expression for the heat-transfer coefficient is in-process got. It allowed on curves coolings of iron casting in a sandy mould to define the row of numeral values of α , proper the different variants of the forced convection, in particular, at moistening of mould in a different degree, and also bringing down and gravity flow of moulding sand round casting. The charts of thermal streams are built, values α , speeds of cooling of the cylindrical iron casting depending on time of cooling.

Ключевые слова: отливка, форма, песок, газовый поток, жидкость, теплопроводность, температуропроводность, хладагенты, колориметр.

Современная теория литейных процессов традиционно рассматривает литейную песчаную форму как однородное тело. Регулирование скорости охлаждения отливки, получаемой в этой форме, в большинстве применяемых техпроцессов возможно практически только путем замены материала формы. Однако, появление в литейных цехах в конце прошлого века песчаных вакуумируемых форм без связующего, образно говоря, когда «химия связующего» уступила место «физике» уплотнения перепадом газового давления сухого формовочного песка за счет создания градиента газового давления на границе «рабочая полость-песок», позволило рассматривать форму как удобный инструмент управления теплообменом между отливкой и формой. В данной работе рассмотрены два способа интенсификации охлаждения отливки и песка: путем введения в форму хладагента, в качестве одного из примеров которого взята вода, а также применения такой новой конвективной составляющей теплопереноса, как поток сухого песка вокруг отливки. Песок, в котором затвердевала отливка, медленно высыпали из нижней части формы (как в песочных часах).

В связи с новизной указанных способов, запатентованных авторами в ряде изобретений (пат. UA 83892, 80928, 83921, заявка UA 200813958), а также с отсутствием в литературе

комплексного теоретического представления о влиянии движущегося в порах песка потока газа или жидкости в качестве теплоносителя под действием поля пониженного давления на скорость охлаждения металла отливки наблюдается недостаток информации для проектирования литейного процесса с операциями регулирования формирования структуры металла отливки в результате усиления теплоотвода через песок литейной формы путем применения упомянутых способов.

Для использования направленного газового потока при охлаждении отливки в форме выбрали комплексный регулирующий параметр – коэффициент теплоотдачи α , учитывающий влияние направленной принудительной конвекции. В отличие от традиционных песчаных форм со связующим, при описании теплового режима которых используют коэффициенты теплопроводности, температуропроводности и тепловой активности материала формы [1], при принудительном охлаждении отливок с применением дополнительных хладагентов, например, в псевдооживленной среде, интенсивность процесса адекватно отражает коэффициент α , который авторы работы [2] определяли с помощью калориметра. В наших исследованиях для определения α использовали альфакалориметр в виде специально изготовленной контейнерной вакуумируемой песчаной формы, в которой получали цилиндрическую чугунную отливку, проводя методом термического анализа записи температурных измерений во времени с помощью термопар и записывающего прибора.

При выводе математического выражения коэффициента теплоотдачи α температурное поле цилиндрической отливки высотой h в литейной форме можно характеризовать изотермическими поверхностями круговых цилиндров, коаксиальных с осью цилиндра отливки. Это поле будет состоять из двух слоев: цилиндрического слоя отливки и цилиндра теплоотводящего слоя в виде дисперсной среды (кварцевого песка). Внутренняя изотермическая поверхность (R_1) радиуса R_1 представляет собой поверхность отливки с температурой T_{R_1} , а внешняя (R_2) радиуса R_2 с температурой T_{R_2} находится в песке формы. Для упрощения расчетов при построении нижеприведенных графиков рассматривали случай, когда $h > 10 R_1$, и пренебрегли теплопередачей в направлении торцов отливки подобно охлаждению «бесконечного цилиндра».

Рассмотрим процесс теплообмена через квазигазовую среду теплоотводящего слоя формы в виде песчаного каркаса с поровым пространством. В указанном случае теплопередача происходит через поверхность раздела двух сред – поверхность контакта отливки с песчаной средой и включает в себя как кондуктивную, так и конвективную составляющие. Как правило, значение теплового излучения при охлаждении отливки ниже $1000\text{ }^\circ\text{C}$ в плотно упакованной песчаной среде формы, обладающей высокой экранирующей способностью поверхностей зерен песка, незначительно, им можно пренебречь и в дальнейшем не учитывать, особенно при сравнении между собой первых двух составляющих.

Количества теплоты, которое передается от отливки через дисперсный теплоотводящий слой, когда поверхность (R_1) имеет температуру T_{R_1} , а поверхность (R_2) – температуру T_{R_2} , вследствие конвективного теплообмена за время t через поверхность отливки площадью $S(R_1)$ на основании закона Ньютона-Рихмана [3] запишем в следующем виде:

$$Q_k = \alpha (T_{R_1} - T_{R_2}) S(R_1) t. \quad (1)$$

Процесс теплопередачи через теплоотводящий слой проходит также и кондуктивным способом (теплопроводностью) [4] и, согласно закону Фурье [5], количество теплоты, отдаваемое через теплоотводящий слой за время t , при кондуктивном теплообмене определяется выражением

$$Q_T = \lambda_n S(r) t dT / dr, \quad (2)$$

где λ_n – коэффициент теплопроводности вещества теплоотводящего слоя (песка формы), r – текущая радиальная координата в интервале $R_1 - R_2$. Отсюда общее количество теплоты, передаваемое через теплоотводящий слой теплопроводностью и конвекцией за время t , запишем следующим образом:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\tau} + Q_{\text{k}} = \lambda_{\text{п}} S(r) dT / dr + \alpha (T_{R1} - T_{R2}) S(R_1) t. \quad (3)$$

С другой стороны, отливка при охлаждении от температуры T_{R1} до T_{R2} за это время через свою поверхность отдаст следующее количество аккумулированной теплоты:

$$Q_{\text{ак}} = C_{\text{v}}^{\text{шил}} (T_{R1} - T_{R2}) m, \quad (4)$$

где m – масса отливки, $C_{\text{v}}^{\text{шил}}$ – теплоемкость материала отливки.

Количество теплоты, проходящее теплоотводящим слоем, определяется соотношением (3), тогда при охлаждении отливки от начальной температуры T_{R1} до температуры T_{R2} должен выполняться баланс тепловой энергии

$$Q_{\text{ак}} = Q_{\text{общ}}. \quad (5)$$

Принимая во внимание выражения (3) – (5), определили время охлаждения отливки в пределах указанных температур

$$t = \frac{C_{\text{v}}^{\text{шил}} (T_{R1} - T_{R2}) m}{\lambda_{\text{п}} S(r) dT / dr + \alpha S(R_1) (T_{R1} - T_{R2})}. \quad (6)$$

Эти выражения составляют основу математической модели, по которой, как указано ниже, можно определить основные характеристики теплообмена цилиндрической отливки в форме, в частности, соотношение протекающих при этом конвективного q_{k} и кондуктивного q_{τ} тепловых потоков.

Как уже отмечалось, теплопередача при конвективном теплообмене определяется законом Ньютона-Рихмана, в котором определяющую роль играет коэффициент теплоотдачи α . Если коэффициент теплопроводности λ является физическим параметром и определяется физическими свойствами вещества дисперсной среды теплоотводящего слоя, то коэффициент теплопередачи α не является физической постоянной для того или иного вещества и в нестационарных процессах теплообмена представляет собой некоторую функциональную зависимость от многих факторов. Поэтому для определения коэффициента теплоотдачи применяли экспериментальный метод исследования процесса теплообмена охлаждаемой цилиндрической отливки из чугуна СЧ20 в песчаной среде, используя предложенную математическую модель. В процессе проведения эксперимента в теплоотводящем слое дисперсной среды литейной формы у поверхности отливки и по глубине с шагом $l = 10$ мм были установлены 5 термопар типа ХА с многоточечным записывающим потенциометром. Проведен цикл измерения температур по толщине песчаного слоя во времени от процесса заливки формы жидким чугуном до его охлаждения до температуры извлечения из формы (300-400 °С).

Количество тепловой энергии Q_{k} , передаваемой конвекцией, определили из выражений (3) и (5)

$$Q_{\text{k}} = Q_{\text{ак}} - Q_{\tau}, \quad (7)$$

где Q_{τ} и $Q_{\text{ак}}$ определяются соотношениями (2) и (4) соответственно.

Далее для определения коэффициента α , устанавливающего связь между тепловым потоком и температурным напором в подвижной среде, обеспечивающей конвекцию, находим количество теплоты, передаваемое телом в единицу времени, то есть тепловой поток. Используя полученные экспериментальные данные значений температур охлаждения отливки во времени в виде температурных записей с помощью термопар, выполним следующее. Рассмотрим точку на поверхности отливки, где размещена первая термопара. Пусть в момент времени $t = \tau_0$ температура поверхности будет $T_{R1}^{\tau_0}$, а в момент времени $t = \tau_0 + \Delta t$ будет $T_{R1}^{\tau_0 + \Delta t}$. Тогда общий тепловой поток $q_{\text{ак}}$ от отливки массы

m в момент времени $t = \tau_0$ при изменении температуры ее поверхности от температуры $T_{R1}^{\tau_0}$ до температуры $T_{R1}^{\tau_0+\Delta t}$ как количество теплоты, проходящее в единицу времени, определяется выражением

$$q_{ак} = \frac{C_v^{цил} m (T_{R1}^{\tau_0} - T_{R1}^{\tau_0+t})}{\Delta t} . \quad (8)$$

Учитывая соотношения (3), (7), (8), для определения величины теплового потока q_k конвекцией будем иметь

$$q_k = \frac{C_v^{цил} m (T_{R1}^{\tau_0} - T_{R1}^{\tau_0+\Delta t})}{\Delta t} - \lambda_n S(r) \frac{dT}{dr} \Big|_{\tau_0+\Delta t} . \quad (9)$$

Используя значения температур, найденных экспериментально, и аппроксимируя производную во втором члене конечно-разностным соотношением, выражение (9) запишется

$$q_k = \frac{C_v^{цил} m (T_{R1}^{\tau_0} - T_{R1}^{\tau_0+\Delta t})}{\Delta t} - \lambda_n S(R_2) \frac{T_{R1} - T_{R2}}{l} \Big|_{\tau_0+t} . \quad (10)$$

Здесь второй член – величина кондуктивного теплового потока в дисперсном теплопроводящем слое; T_{R2} – температура песчаного слоя на расстоянии l от поверхности отливки, определяемая экспериментально соответствующей термопарой; $S(R_2)$ – площадь цилиндрической поверхности песчаного слоя, проходящая на расстоянии l от поверхности отливки через точку расположения соответствующей термопары.

Тогда коэффициент теплоотдачи α от поверхности отливки (R_1), учитывая соотношения (1) и (10), запишется

$$\alpha = \frac{q_k}{S(R_1) \Delta T} , \quad (11)$$

где q_k определяется соотношением (10), $\Delta T = (T_{R1} - T_{R2})|_{\tau_0}$ – температурный напор от поверхности отливки в точке размещения соответствующей термопары в некоторый момент времени $t = \tau_0$.

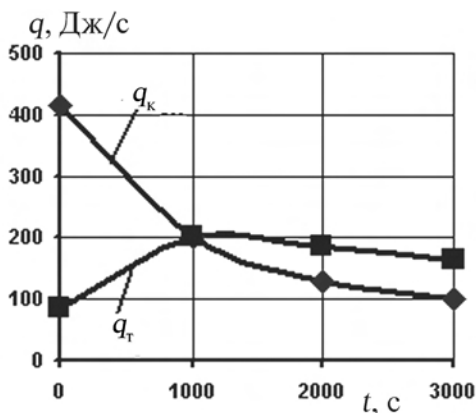
Аналогично находим коэффициенты теплоотдачи α для ряда других моментов времени t . Интегральный коэффициент теплоотдачи, который считали общим для всего процесса охлаждения, определяли как среднее арифметическое коэффициентов теплоотдачи в различные моменты времени. Принимая во внимание соотношение (6), для определения скорости охлаждения отливки на промежутке времени $t = [\tau_0, \tau_0 + \Delta t]$ имеем

$$V = \frac{S(R_1) \alpha (T_{R1} - T_{R2}) \left(\lambda_0 + S(R_2) \lambda_n \frac{(T_{R1} - T_{R2})}{l} \right) \Big|_{\tau_0+\Delta t}}{C_v^{цил} m} . \quad (12)$$

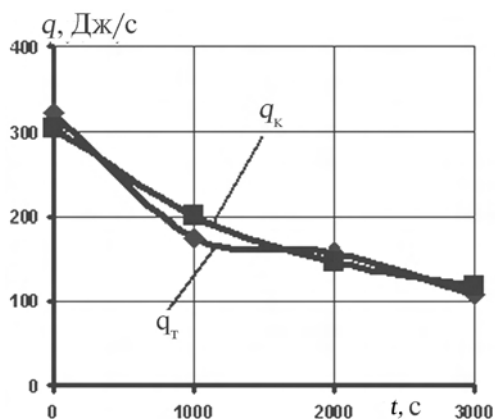
Используя описанную выше математическую модель теплопереноса, путем подстановки численных значений в выражения для тепловых потоков в виде двух основных составляющих конвективной q_k по выражению (10) и кондуктивной q_r , полученной из выражения (2), построили графики изменения во времени этих тепловых потоков. Для этого применяли следующие значения: для цилиндрической отливки $\rho_{п} = 7800$ кг/м³, $R_1 = 0,025$ м, $h = 0,3$ м, $C_v^{цил} = 0,50$ кДж/(кг · К); для песка $C_v^{песка} = 0,82$ кДж/(кг · К), $\rho_{п} = 1600$ кг/м³, $\lambda = 0,23$ Дж/(кг · К); для воды $C_v^{воды} = 4,19$ кДж/(кг · К), а также изменения

значений температур поверхности отливки, слоев песка, записанные при помощи термопар в соответствующие им интервалы времени.

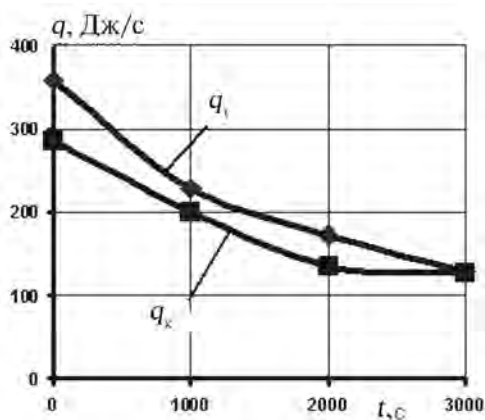
На рис. 1, *a* показаны тепловые потоки в форме из сухого кварцевого песка при заливке расплавом и охлаждении цилиндрической отливки диаметром 50 мм из серого чугуна. Монотонное уменьшение кондуктивного потока связано с уменьшением температурного напора во времени. Рост q_k по мере охлаждения отливки связан с увеличением контактного зазора отливки с поверхностью формы вследствие ее термической усадки и с проникновением в зазор потоков воздуха, усиливающих конвекцию. Слои песка по мере прогревания теплом отливки имеют меньший перепад температуры, и значение конвективной составляющей убывает.



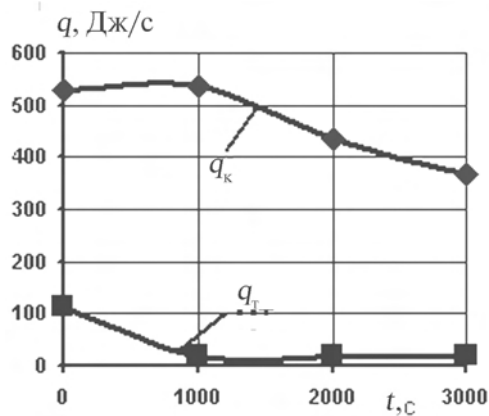
a



б



в



г

Рис. 1. Изменение величины кондуктивной q_k и конвективной q_r составляющих теплового потока при охлаждении цилиндрической отливки из серого чугуна в форме из сухого кварцевого песка (*a*); с добавкой в форму 200 г воды (*б*); с добавкой в форму 800 г воды (*в*); с высыпанием песка из формы через 1 мин после заливки (*г*)

На рис. 1, *б* показаны тепловые потоки при получении указанной цилиндрической отливки в процессе заливки расплавом чугуна формы из сухого кварцевого песка с добавкой через 1 мин после заливки 200 г воды в верхнюю часть формы по предварительно введенной металлической трубке с отверстием на расстоянии около 10 мм от отливки. Вода в течение 10 с впиталась в вакуумируемый песок, конец трубки в песке размещали так, чтобы отливка находилась в контейнерной опоке на пути просачивания воды в сторону вакуум-фильтров.

В этом случае подача в контактный слой формы воды как хладагента сразу увеличила конвективную составляющую, которая в начальный момент возросла более чем в 3 раза по сравнению с предыдущим графиком. Вода наряду с воздухом участвует в конвектив-

ном переносе как переносящая тепло движущаяся среда, а фазовый переход воды в пар с последующей конденсацией пара в более холодных зонах песка также интенсифицирует теплоперенос. Обе составляющие теплового потока практически равны по величине на протяжении всего цикла охлаждения отливки, которое происходит быстрее по сравнению с предыдущим графиком.

На рис. 1, *в* показаны тепловые потоки для той же цилиндрической отливки в форме из сухого кварцевого песка с добавкой через 1 мин после заливки 800 г воды (3,2 % от массы песка) способом, аналогичным предыдущему случаю. Вода за 26 с впиталась в вакуумируемый песок формы. При этом увеличение подачи воды в форму практически не изменило конвективную составляющую по сравнению с предыдущим экспериментом.

Наиболее вероятное объяснение этого в том, что увеличение влажности слоя песка приводит к уменьшению его газопроницаемости. Вода заполняла поры песка, накапливалась в переувлажненной зоне вблизи границы слоя со стоградусной температурой, который постепенно перемещался в сторону от отливки при постепенном прогреве песка. Однако в этом слое газопроницаемость может снижаться в 3 раза и более, и он, находясь в песке вокруг отливки, тормозит конвективный перенос движущейся среды. Такое переувлажнение также характерно для сырой песчано-глинистой формы. Путем повышения влажности песка увеличили его теплопроводность за счет увеличения плотности увлажненного песка, что отразилось на q_T , который стал выше, чем в предыдущем случае, что в сумме на всей продолжительности охлаждения дало усиление теплоотвода.

На рис. 1, *г* показаны тепловые потоки при получении указанной цилиндрической отливки при следующих условиях. По истечении 1 мин после заливки формы расплавом чугуна песок в течение 17 мин самопроизвольно высыпался из формы через отверстие (пробку открывали) диаметром 15 мм, специально выполненном в нижней части контейнерной опоки. Песок медленно опускался вокруг отливки, обтекая ее стенки. Во время его гравитационного течения холодные слои песка нагреваются при контакте с отливкой и нагретыми песчинками переносят тепло, высыпаясь из полости опоки. Отливка плавно опускается на дно контейнерной опоки и охлаждается на воздухе при его свободной конвекции. Аналогичное обтекание струями движущейся среды показано на рис. 2 [7] для горизонтально расположенного цилиндра (*а*) и наклонной пластинки (*б*), а также струями свободной конвекции воздуха при охлаждении цилиндра (*в*), в частности, по окончании высыпания песка из опоки.

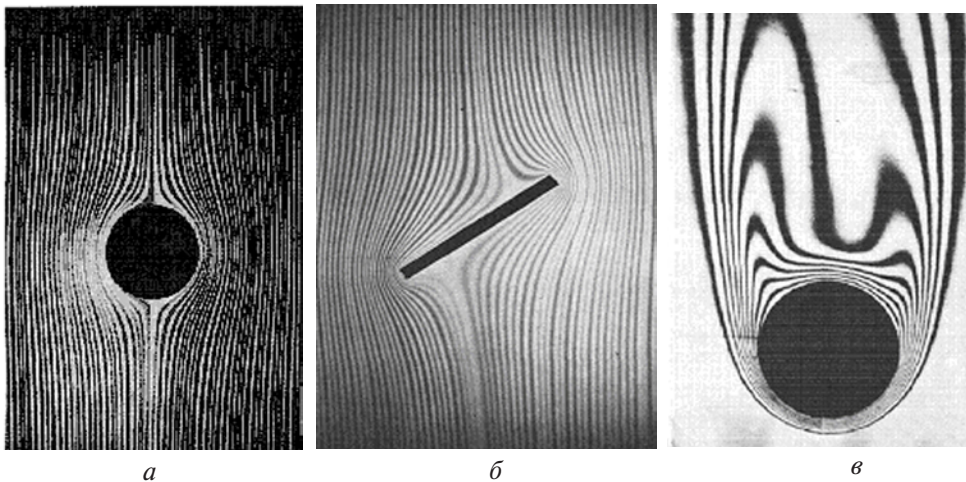


Рис. 2. Течение среды при обтекании горизонтально расположенного цилиндра (*а*); наклонной пластинки (*б*); струи свободной конвекции воздуха при охлаждении цилиндра (*в*)

На графике (рис. 1, *г*) видно, что в начальный период времени движения песка конвективная составляющая в 5 раз больше кондуктивной, затем последняя снижается практически до нуля при высыпании песка. Низкое значение q_T вызвано снижением плотности ранее виброуплотненного песка (разуплотнения) после его постепенного послойного сдвига и

приведения в движение при повышении его пористости, которая значительно влияет на теплопроводность песка. Кроме того, пористость текучего песка выше пористости неподвижного песка, при течении песчинки могут частично перекатываться и иметь разную скорость опускания в зависимости от разной их дисперсности и плотности. При этом по мере разуплотнения и высыпания песка в нижней части формы происходит проседание отливки с возможным поворотом в сторону наибольшего разуплотнения песка.

Сравнение графиков (рис. 1, *a-z*) показывает, что увеличение пористости песка, которое происходит путем постепенного разуплотнения от нижних слоев к верхним, значительно (в начальный момент в 4 раза по рис. 1, *a*) снижает теплопроводность и увеличивает конвективный поток газа между песчинками. Но основную роль выполняет течение песка с его нестационарной гидродинамикой движения. Текущий песок является средой конвективного переноса тепла со свойственными ему закономерностями взаимного перемешивания частиц, за счет чего резко (почти в 6 раз по рис. 1, *a* и *z*) возрастает q_k и наблюдается его незначительный рост до момента высыпания песка.

Охлаждение цилиндра свободной конвекции воздуха, вызванной разностью плотности нагретых и холодных его объемов в поле гравитационных сил, следовало после высыпания песка (рис. 2, *в*). Охлаждение на воздухе нагретых деталей является одной из операций термической обработки металлоизделий, а воздух относится к одной из закалочных сред. В этом случае q_k практически полностью определяет весь тепловой поток, монотонное уменьшение которого наблюдается до момента извлечения отливки из опустошенной от песка опоки.

Используя выражение (11), произвели расчет численных значений коэффициента α для рассматриваемых условий охлаждения отливки, тепловые потоки которых показаны на рис. 1, *a-z*. Для этих четырех условий охлаждения цилиндрической отливки из марки СЧ20 в литейной форме на рис. 3 графически представлены изменения значений коэффициента α от времени. На первых трех кривых видно, что введением в песок воды достигали того, что среднее значение α при введении 200 г выше, чем при введении 800 г. С добавлением воды мы как бы переводим форму в теплофизическом плане из категории сухой формы в категорию сырой, аналогичные случаи с описанием теплофизики такого перевода в литературе не выявлены.

Различие тепловых свойств сухих и сырых форм при применении одной методики тепловых расчетов вызывает необходимость учитывать перенос теплоты за счет испарения воды. При подаче воды в песок вблизи отливки влага интенсивно испаряется при

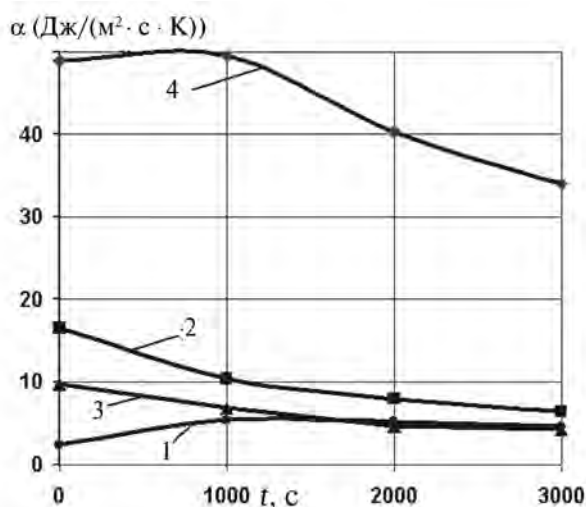


Рис. 3. Изменение коэффициента теплоотдачи при охлаждении цилиндрической отливки из серого чугуна от времени: 1 – без добавки воды в форму; 2 – добавление 200 г воды в форму; 3 – добавление 800 г воды в форму; 4 – с высыпанием песка

достижении температуры кипения. Поверхностный слой формы вблизи отливки быстро прогревается, фронт испарения перемещается в глубь формы, а пар, проходя по порам, конденсируется в непрогретых местах формы, перенося при этом большое количество теплоты. В связи с этим эффективная теплопроводность увлажненной формы заметно возрастает по сравнению с теплопроводностью сухой формы, что также влияет на возрастание скорости охлаждения, что видно на графике (рис. 5).

Если при охлаждении отливки в сухой песчаной форме тепловые эффекты фазовых переходов в материале формы играют второстепенную роль и их действие можно

учесть с помощью эффективных значений теплоемкости и теплопроводности, то тепловые эффекты кипения и конденсации влаги в сырой форме соизмеримы с основными видами переноса теплоты, что и отражено на взаимном расположении кривых на рис. 3, которые полностью коррелируются с графиком (рис. 4).

Для расчетных значений α , отраженных на графике (рис. 3), использовали температурный напор ΔT в слое песка вокруг отливки, представленный на графике (рис. 4) по результатам экспериментов. На этом графике, построенном на основе кривых охлаждения, отражены изменения ΔT в слое песка толщиной 10 мм вокруг отливки во времени при первых трех сериях опытов, тепловые потоки которых изображены на рис. 1, а-в. Расположение кривых с учетом обратной пропорциональности полностью коррелирует с графиком (рис. 3). Значения ΔT на рис. 4 во многом определяют соотношения величин потоков q_k и q_r , анализированные ранее, так как ΔT и аналогичное ему d_T входят в математические выражения этих обоих потоков.

В итоге закономерность полученного на рис. 3 взаиморасположения трех нижних кривых основана на существенном влиянии на величину α величины температурного напора ΔT в слое песка. В частности, ΔT растет с увеличением добавок воды с 200 до 800 г при соответствующей ее конденсации, которая является весьма энергоемким процессом, охлаждающим одну из сторон (дальнюю от отливки) экспериментально исследуемого 10-миллиметрового песчаного слоя. При этом, как показано выше (рис. 1, б, в), q_k практически не изменяется, q_r растет, обеспечивая рост суммарного теплового потока в целом.

Для кривой 4 (рис. 3), когда практически весь процесс определяется потоком q_k , сначала до постепенного разупрочнения (из состояния покоя), процесс вовлечения песка в гравитационное движение и при последующем обтекании отливки верхними холодными слоями песка до его полного высыпания идет незначительно (значение α), а затем он определяется свободной конвекцией воздуха с падением значения α по мере охлаждения отливки. При этом величина α , согласно кривой 4, в 5-6 раз выше значений, описанных кривыми 1-3. Это показывает высокую эффективность использования сыпучести песка путем самопроизвольного его высыпания с последующей свободной конвекцией воздуха при регулировании процесса получения отливки, скорость охлаждения которой при рассматриваемых видах воздействия показана на рис. 5.

Из графика (рис. 5) видно, что увлажнение песка в близких слоях к отливке до 3,3 % воды по массе песка дает увеличение скорости охлаждения в начальный момент на 26 %, а процесс начала сдвига песка при высыпании – на 16 %. Однако, в целом за период охлаждения в течение 50-55 мин после заливки металла увлажнение до 0,83 % увеличивает среднюю скорость охлаждения на 0,7 %, увлажнение до 3,3 % увеличи-

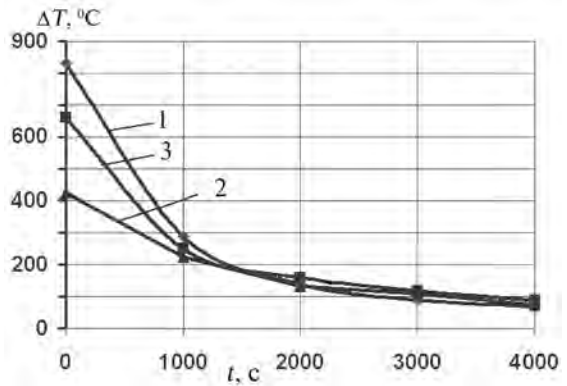


Рис. 4. Изменение температурного напора в песчаном слое толщиной 10 мм: 1 – без добавки воды в форму; 2 – добавление 200 г воды в форму; 3 – добавление 800 г воды в форму

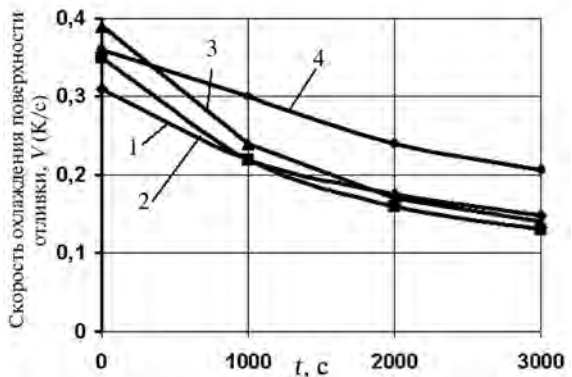


Рис. 5. Изменение скорости охлаждения цилиндрической отливки из чугуна от времени: 1 – в сухом песке; 2 – при добавлении 200 г воды в форму; 3 – при добавлении 800 г воды в форму; 4 – с высыпанием песка

вает эту скорость на 10,1 %, а дозированное гравитационное течение при высыпании песка в течение 17 мин – на 35,8% .

Таким образом, полученное выражение для коэффициента α позволило по данным проведенных экспериментов определить ряд численных его значений, соответствующих различным вариантам принудительной конвекции при целенаправленном изменении ее вида и интенсивности в литейной форме из сухого песка. Каждому значению α для исследованной отливки соответствует величина скорости охлаждения, влияющая на характеристики структуры и механические свойства металла, что позволит за счет регулирования режимов теплопереноса изменять функциональные свойства отливок.



Список литературы

1. Жуковский С. С. Формовочные материалы и технология литейной формы. - М.: Машиностроение, 1993. - 301 с.
2. Чудайкин А. И., Калинин В. П. Псевдооживленная среда как средство управления кристаллизации отливки // Литейн. пр-во. – 2004. – № 12. – С. 19-20.
3. Зельдович Я. Б., Мышкис А. Д. Элементы математической физики. - М.: Наука, 1974. - 352 с.
4. Беляев Н. М., Рядно А. А. Математические методы теплопроводности. - Киев: Вища шк, 1993. - 416 с.
5. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. - М.: Наука, 1966. - 724 с.
6. Владимиров В. С. Уравнения математической физики - М.: Наука, 1971. - 512 с.
7. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. - М.: Мир, 1985. - 182 с.

Поступила 08.01.2009

ВНИМАНИЕ!

Предлагаем разместить в нашем журнале рекламу Вашей продукции или рекламный материал о Вашем предприятии. Редакция также может подготовить заказной номер журнала.

Стоимость заказного номера - 4000 грн.

**Расценки на размещение рекламы
(цены приведены в гривнях)**

Размещение	Рекламная площадь	Стоимость, грн.
Рекламные блоки в текстовой части журнала		
Цветные	1/2 страницы	900
	1/3 страницы	600
	1/4 страницы	300
Черно-белые	1/2 страницы	550
	1/3 страницы	380
	1/4 страницы	200
Цветная реклама на обложке		
Третья страница обложки	1 страница	2800
	1/2 страницы	1400
	1/4 страницы	700
Четвертая страница обложки	1 страница	3100
	1/2 страницы	1550
	1/3 страницы	1000

При повторном размещении рекламы - скидка 15 %

Наш адрес: **Украина, 03680, г. Киев-142, пр. Вернадского, 34/1**
 Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины
Справки телефон: (044) 424-12-50, 424-03-50
факс: (044) 424-35-15; **E-mail:** proclit@ptima.kiev.ua