

П. Б. Калюжный, И. А. Шалевская, О. А. Яковышин\*

Восточноукраинский национальный университет им.В. Даля, Северодонецк

\*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## Исследование метода управления процессом кристаллизации отливок в вакуумируемых формах

*Изложены результаты опытов по исследованию метода охлаждения отливок в псевдооживленном слое кварцевого песка. На основе термовременных зависимостей установлено влияние скорости потока воздуха, температуры песка и среднего размера частиц песка на интенсивность охлаждения отливки.*

**Ключевые слова:** интенсивность охлаждения, теплообмен, псевдооживленный слой, скорость потока воздуха, температурный напор, размер частиц песка

Среди созданных в последние десятилетия технологий для производства отливок всё более широко используются физические методы внешнего воздействия на процессы формирования отливки, целью которых является ускорение или избирательное регулирование скорости затвердевания и охлаждения отливки путём целенаправленного вмешательства в процессы тепло-массообмена в системе форма-отливка. Эти методы, прежде всего, включают изменение градиентов температуры в контактной зоне металл-форма при затвердевании и охлаждении отливки. При этом чаще всего используют различные способы дозированного привлечения хладагента в контактную зону, включая организацию его направленной конвекции, используют охлаждение за счёт тепловых затрат на фазовое превращение материалов в контактной зоне и другие.

При этом вакуумируемые формы из песка без связующего являются наиболее перспективными для управления теплообменом между отливкой и формой, поскольку сухой песок не имеет жёстких связей между песчинками и после снятия действия перепада давления может свободно перемещаться в объёме формы. Эта особенность и была положена в основу создания метода управления процессом охлаждения отливок в формах из сухого песка [1]. Сущность этого способа заключается в том, что после образования тонкой поверхностной корки металла песок литейной формы приводится в псевдооживленное состояние за счёт продувки воздухом в вертикальном направлении. При переходе неподвижного слоя в псевдооживленный происходит интенсивное перемешивание частиц песка в объёме слоя и поэтому интенсивность теплообмена между отливкой и песком резко возрастает [2]. Такая особенность указанного способа позволяет, изменяя скорость охлаждения, управлять формированием структуры и свойств отливки.

Анализ общей литературы по технике псевдооживления показал, что интенсивность теплообмена тела с псевдооживленным слоем зависит от ряда параметров процесса, основными из которых являются скорость оживающего газа, размер частиц песка, теплофизические свойства песка и газа, конструкция газораспределительной решетки, конструктив-

ные особенности литейной формы и другие. К сожалению, информации о теплообменных процессах между отливкой и псевдооживленным слоем песка, в котором получают данную отливку, не было найдено.

Поэтому целью работы было исследовать влияние параметров процесса на интенсивность охлаждения отливки в псевдооживленном слое. При этом были выбраны параметры, которыми можно было варьировать без существенного изменения технологии производства отливок в вакуумируемых формах.

Для достижения данной цели был выбран упрощённый вариант опытов, который заключался в охлаждении нагретого стального образца в контейнерной форме.

Методика экспериментов базировалась на термическом анализе охлаждения стального образца в контейнерной форме, показанной на рис. 1.

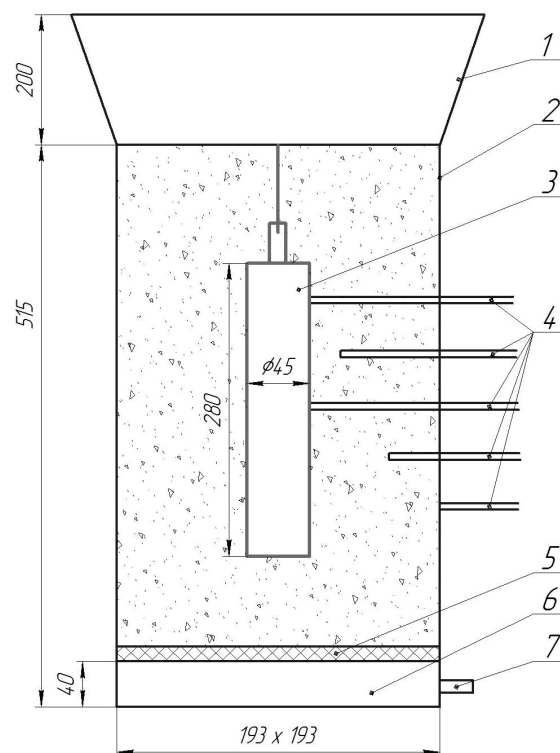


Рис. 1. Схема контейнерной формы

Контейнерная форма 2 сконструирована так, что в её донной части находилось газораспределительное устройство 5 (плита с отверстиями, накрытая мелкой сеткой). Образованная под газораспределительным устройством полость 6 сообщалась с системой подачи сжатого воздуха через штуцер 7. Стальной образец 3 размещался в контейнере и засыпался песком. Для регистрации кинетики изменения температуры во времени в форму вмонтировано пять хромель-алюмелевых термопар 4, позволяющих фиксировать температурные поля в разных сечениях по высоте образца и на разной глубине в наполнителе формы. Измерение термоэлектродвижущей силы (термоЭДС), преобразование её в значения температуры, запись в память и последующая передача в компьютер проводилась с использованием многоканального устройства МИТР-8. Расход воздуха регулировался краном, и измерялся расходомером. Для предотвращения высыпания песка при его псевдоожигении на верх контейнера устанавливалась наполнительная рамка 1.

Во всех опытах нагрев стального образца проводили в лабораторной трубчатой электропечи до температуры 700 °С. Нагретый образец помещался в контейнер и засыпался кварцевым песком. При этом на определённом расстоянии от поверхности образца размещались термопары. Масса образца составляла 3,58 кг, масса песка в форме – 25 кг.

Первым изменяемым параметром процесса была выбрана скорость потока воздуха в свободном сечении контейнера. Поскольку сечение контейнера оставалось постоянным, то скорость потока определяли через объёмный расход подаваемого воздуха.

Для выяснения характера влияния скорости потока воздуха на интенсивность охлаждения образца была поставлена серия экспериментов. Начальная температура образца, песка и воздуха, масса песка и образца в рамках этой серии опытов оставались постоянными. Скорость потока воздуха в сечении

контейнера изменялась путём изменения расхода подаваемого воздуха (в пределах, которые позволяло обеспечить используемое оборудование).

На рис. 2 показаны термовременные зависимости охлаждения образца и нагрева песка за первые 140 с после начала псевдоожигения. Скорость оживающего воздуха в первом опыте (кривые 1 и 3) равнялась 0,0687 м/с, что соответствовало расходу воздуха 0,00256 м<sup>3</sup>/с. Во втором опыте (кривые 2 и 4) скорость потока воздуха была 0,111 м/с при расходе воздуха 0,00414 м<sup>3</sup>/с. Кривые 1 и 2 отображают показания термопары, установленной на поверхности образца, кривые 3 и 4 – показания термопары, размещенной в слое песка на расстоянии 30 мм от поверхности образца.

Следует отметить, почему термовременные зависимости (рис. 2), полученные при помощи термопар, имеют пульсирующий характер. Это связано с локальным изменением условий теплообмена вблизи поверхности образца. Объясняется такой механизм теплообмена так называемой «пакетной теорией» [3, 4]. Пакеты частиц песка (достаточно плотные группы частиц) из объёма слоя подходят к поверхности образца и соприкасаются с ней в течение некоторого времени, а затем уходят в объём, сменяясь пузырьём. То есть с поверхностью образца периодически контактируют, то газовые пузыри, то пакеты частиц. За время соприкосновения происходит нестационарный прогрев пакета и ему передаётся некоторое количество теплоты. Основная доля тепла отдаётся от поверхности образца в период её контакта с пакетами частиц, поэтому на графике мы наблюдаем снижение температуры. Пузыри лишь перемещают нагретые пакеты частиц в глубину слоя, а холодные – к теплоотдающей поверхности. При смене пакета пузырьём резко снижается теплопроводность, поэтому мы наблюдаем рост температуры.

Результаты первой серии опытов показывают, что средняя скорость охлаждения поверхности образца

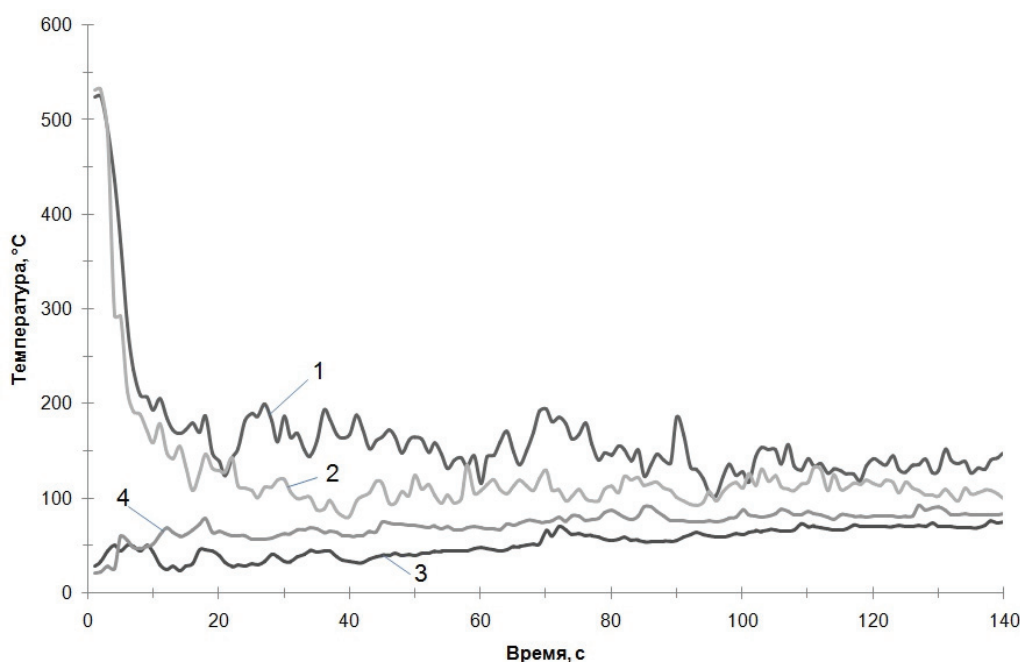


Рис. 2. Кинетика изменения температуры образца и песка при разной скорости потока воздуха

за первые 5 с после начала псевдооживления составила  $57,6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  при скорости потока воздуха  $0,0687\text{ м}/\text{с}$  и  $68\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  при  $0,111\text{ м}/\text{с}$ . Далее для обеих значений скоростей потока наблюдается снижение скорости охлаждения поверхности образца до  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . С охлаждением образца наблюдается повышение температуры песка (кривые 3 и 4, рис. 2). При скорости воздуха  $0,0687\text{ м}/\text{с}$  температура песка повышается в среднем на  $0,34\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , а при скорости  $0,111\text{ м}/\text{с}$  – на  $0,44\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . При меньшей скорости потока воздуха прогрев песка происходит менее интенсивно, чем при более высокой скорости потока.

Отсюда можно сделать вывод, что чем выше скорость оживающего газа, тем интенсивнее перемешивание частиц, выше частота встреч отдельных частиц или их групп с поверхностью образца, то есть интенсивнее отвод тепла от поверхности образца вглубь псевдооживленного слоя.

В ряде случаев для лучшего заполнения формы или в целях снижения временных и энергетических затрат на охлаждение песка при изготовлении вакуумируемых форм используют горячий песок. Поэтому важно определить влияние начальной температуры песка на интенсивность охлаждения отливки в псевдооживленном слое. Для изучения этого влияния был поставлен ряд опытов: в одних использовали холодный песок с температурой  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в других горячий с температурой  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этом расход воздуха и его температура не изменялись. Часть результатов опытов в виде временных зависимостей температуры поверхности образца (кривые 1 и 2) и слоя песка (кривые 3 и 4) показана на рис. 3. За точку отсчёта времени взят момент начала псевдооживления песка в контейнере.

На рис. 3 видно, что в начальный период времени происходит резкое снижение температуры поверхности образца как при использовании горячего песка (кривая 1), так и холодного (кривая 2). Однако температура образца, до которой наблюдается это резкое

снижение, для опыта с горячим песком составила  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а для опыта с холодным песком –  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это объясняется более высоким температурным напором в опыте с холодным песком. Время охлаждения образца до температуры  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  при использовании холодного песка составило  $200\text{ с}$ , а при использовании горячего песка  $360\text{ с}$ .

Изменение температуры песчаного слоя в опыте с горячим песком отображено кривой 3 (рис. 3), в опыте с холодным песком – кривой 4. В обоих случаях интенсивное увеличение температуры песка наблюдается в начальный период. Температура песка в опыте с горячим песком достигла максимального значения в  $112\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в опыте с холодным песком –  $84\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Данные опыты показали, что с течением времени характер изменения разности температур между поверхностью образца и песчаным слоем в обоих случаях одинаков. Только в опыте с холодным песком на протяжении всего времени охлаждения температурный напор на  $10\text{--}15\text{ }^{\circ}\text{C}$  меньше, чем в опыте с горячим песком. Из этого следует, что начальная температура песка определяет начальный температурный напор, но не изменяет характер теплообмена между отливкой и псевдооживленным слоем. При повышении начальной температуры песка будет увеличиваться время охлаждения отливки в форме. Используя горячий песок, можно влиять на процессы затвердевания отливки, но с меньшей интенсивностью, чем при использовании холодного песка.

В следующих экспериментах было исследовано влияние среднего размера песчинок на интенсивность теплообмена между образцом и псевдооживленным слоем. Для этого в разных опытах использовали кварцевый песок с разным средним размером зерна. Расход воздуха, температура песка и воздуха не изменяли. Результаты данных опытов в виде временных зависимостей температуры поверхности образца показаны на рис. 4. Кривая 1 отображает изменение температуры образца в

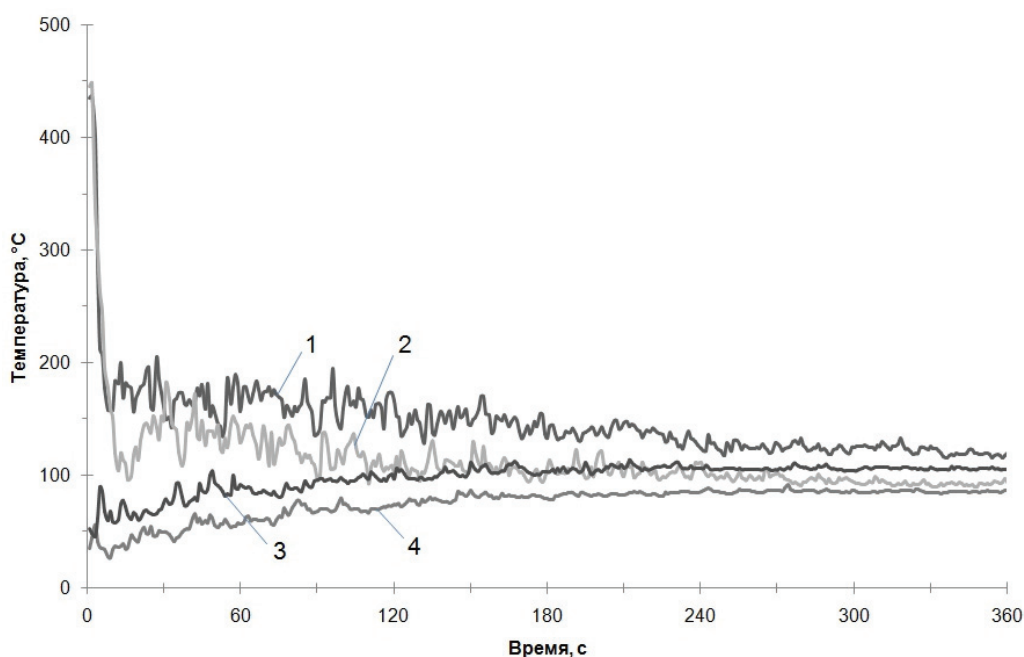
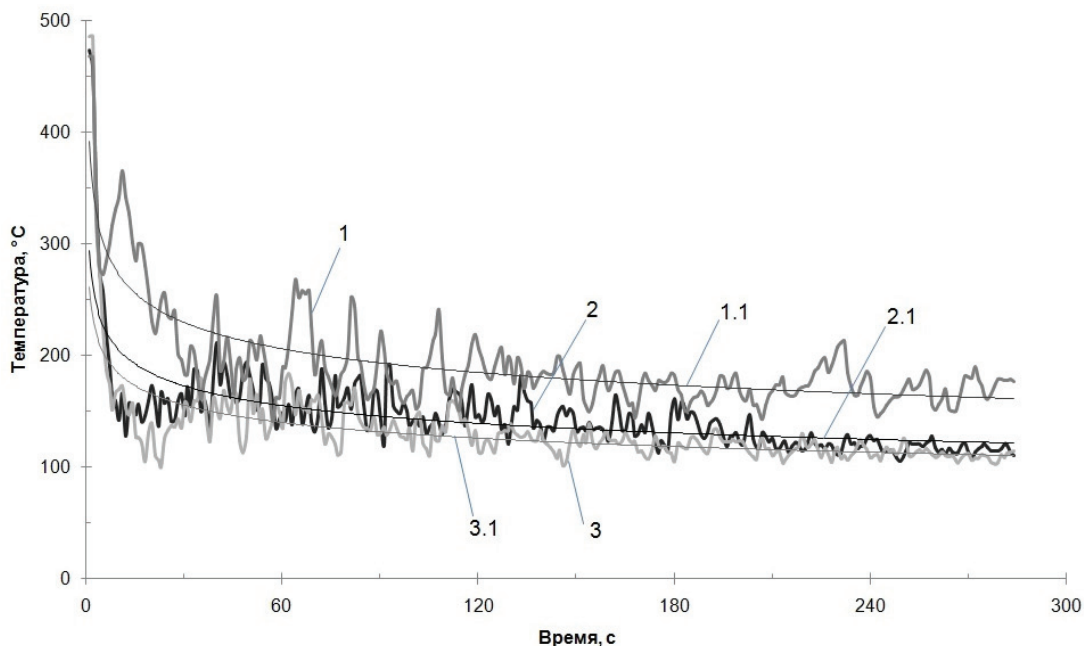


Рис. 3. Кинетика изменения температуры образца и песка при разной начальной температуре песка



**Рис. 4.** Кинетика изменения температуры образца при использовании песка с разным средним размером зерна

песке со средним размером частиц 0,3 мм, кривая 2 – в песке со средним размером частиц 0,16 мм, кривая 3 – в песке со средним размером частиц 0,1 мм. Линии 1.1, 2.1 и 3.1 – степенные линии тренда кривых 1, 2 и 3 соответственно.

Из рисунка 4 видно, что более интенсивное охлаждение наблюдается в песке с наименьшим средним размером частиц. За первые 30 с после начала псевдооживления средняя скорость охлаждения образца в песке со средним размером частиц 0,3 мм составила 9,1 °C/с, в песке со средним размером зерна 0,16 мм – 10,4 °C/с, в песке со средним размером зерна 0,1 мм – 11,7 °C/с. Результаты данных опытов свидетельствуют о том, что с увеличением размера частиц песка скорость охлаждения образца в псевдооживленном слое будет уменьшаться.

Передвигаясь в слое, песчинки получают тепло от поверхности образца и транспортируют его вглубь основной массы псевдооживленного слоя. Воздух тоже переносит теплоту, но его объёмная теплоёмкость намного меньше, чем у частиц песка, и вклад в теплоперенос незначителен. Частицы песка большего размера обеспечивают меньшую площадь контактов с поверхностью образца, чем меньшие частицы, поэтому теплообмен между поверхностью образца и слоем песка менее интенсивен для частиц большего размера.

Таким образом, в соответствии с проведёнными исследованиями по влиянию параметров процесса на интенсивность охлаждения отливки в псевдооживленном слое установлено:

– увеличение скорости потока воздуха способствует увеличению интенсивности теплообмена между отливкой и псевдооживленным слоем;

– начальная температура песка не изменяет характер теплообмена между отливкой и псевдооживленным слоем, а только определяет начальный температурный напор;

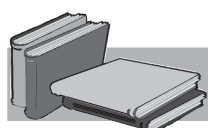
– с повышением начальной температуры песка продолжительность охлаждения отливки в форме будет увеличиваться;

– с увеличением среднего размера зерна песка интенсивность охлаждения отливки в псевдооживленном слое будет уменьшаться;

– интенсификация процесса затвердевания отливки не увеличивает количественные показатели по выбросу вредных веществ в атмосферу, а за счёт сокращения скорости охлаждения уменьшаются продолжительность выброса вредных веществ, что способствует снижению вредного воздействия литейных технологий на окружающую среду;

– полученные экспериментальные данные будут использованы для вывода математической зависимости коэффициента теплообмена от скорости потока газа, температуры песка и среднего размера частиц;

– варьируя указанные параметры, можно управлять процессами затвердевания и охлаждения отливок в формах из кварцевого песка за счёт его псевдооживления.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 97151 Украины, МПК В22D 27/04. Способ охлаждения отливок в литейной форме / П. Б. Калюжный, А. Н. Голофаев, Ю. И. Гутько – Опубл. 10.03.2015, Бюл. № 5.

2. Шалевская И. А. Применение псевдооживленного слоя в технологическом процессе производства отливок в вакуумируемых формах / И. А. Шалевская, П. Б. Калюжный // *Металл и литьё Украины*. – 2015. – № 4 (263). – С. 24-27.
3. Процессы тепло- и массопереноса в кипящем слое / А. П. Баскаков, Б. В. Берг, А. Ф. Рыжков, Н. Ф. Филипповский. – М.: *Металлургия*, 1978. – 248 с.
4. Тодес О. М. Аппараты с кипящим зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы / О. М. Тодес, О. Б. Цитович. – Л.: *Химия*, 1981. – 296 с.

## Анотація

*Калюжный П. Б., Шалевська І. А., Яковишин О. А.*  
Дослідження методу управління процесом кристалізації виливків у вакуумованих формах

*Викладено результати досліджень методу охолодження виливків у псевдозрідженому шарі кварцового піску. На основі термочасових залежностей встановлено вплив швидкості потоку повітря, температури піску та середнього розміру частинок піску на інтенсивність охолодження виливка.*

## Ключові слова

*інтенсивність охолодження, теплообмін, псевдозріджений шар, швидкість потоку повітря, температурний напір, розмір частинок піску*

## Summary

*Kaliuzhnyi P., Shalevska I., Iakovyshyn O.*  
Research of control method for crystallization castings in vacuumized moulds

*The experiments results on research of castings cooling method in silica sand fluidized bed are presented. On the basis of thermal-time dependence influence of airflow rate, sand temperature and sand particle size on cooling intensity of casting is identified.*

## Keywords

*cooling intensity, heat exchange, fluidized bed, airflow rate, temperature pressure, sand particle size*

Поступила 05.08.2015