

## **Технология, оборудование, САПР и экология литейного производства**

*The technology of castings gaining in process of investment casting, seeking to reducing of castings costs, enhancement of shell mold properties and gaining castings with improved geometric relationship, which based on application of ceramic shell mold with intermediate porous layer and sump in the form of half of torus, which produced by polymeric model with porosity about 30–40% was developed.*

*И. Г. САПЧЕНКО, С. Г. ЖИЛИН,*

*Г. М. СЕВАСТЬЯНОВ, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН*

УДК 621.74.045

## **ПОВЫШЕНИЕ РАЗМЕРНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ В ЛИТЬЕ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ\***

С ростом потребности отрасли машиностроения в точных металлоизделиях из труднообрабатываемых сплавов возрастает роль специальных способов литья. Анализ тенденций развития технологических процессов формообразования показывает, что качество металла, точность и чистота поверхности отливок являются основными критериями условий развития литейного производства.

Литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) позволяет получать металлоизделия с геометрической точностью, максимально приближенной к готовой детали, не требующей в некоторых случаях механической обработки. Однако применение ЛВМ отличается высокой себестоимостью металлопродукции, что определяет недопустимость брака в ее производстве. Брак в ЛВМ имеет место на стадиях изготовления полимерных моделей (ПМ) и керамических оболочковых форм (КОФ), удаления моделей из КОФ, термообработки КОФ, заливки КОФ расплавом металла и обусловливается деформационными процессами, протекающими вследствие технологических особенностей производства и свойств используемых материалов. Изготовление ПМ и формирование КОФ сопровождается усадочными процессами, удаление ПМ из КОФ – расширяющим воздействием на последнюю, термообработка КОФ – ее температурными деформациями в связи с неравномерностью прогрева, заливка КОФ – термо- и гидродинамическим воздействием расплава металла.

Одним из направлений снижения брака, повышения качества и технологических свойств ПМ

и КОФ является управление их структурно-морфологическим строением путем образования пористости определенных параметров и, как следствие, деформационными процессами. Деформационные процессы пористых структур взаимодействующих компонентов технологических систем «ПМ – КОФ» и «КОФ – расплав металла» при сложнагруженном состоянии мало изучены, а их исследование актуально.

Таким образом, цель проведенной работы – разработка теоретических и практических принципов создания пористости в структурах взаимодействующих ПМ и КОФ, управление их параметрами и деформационными процессами для повышения точности литья и снижения его себестоимости.

В ходе эксперимента предложен принципиально новый подход в изготовлении ПМ с пористой структурой, направленный на реализацию управления их качеством и деформационными свойствами; исследовано влияние технологических режимов изготовления пористых полимерных моделей (ППМ) и соотношения исходных материалов на их физико-механические, технологические и эксплуатационные свойства; разработаны методы образования пористых структур КОФ, управления параметрами их пористости и напряженно-деформированным состоянием (НДС); выявлены особенности НДС пористых КОФ в процессе изготовления, удаления ПМ, заливки расплавом металла; теоретически обоснована и практически подтверждена предпочтительность расположения пористости во внутренней части структуры КОФ.

\* Результаты работы получены при поддержке гранта ДВО РАН 09-III-B-03-085 «Исследование деформационной устойчивости моделей повышенной размерно-геометрической точности в литье по выплавляемым моделям».

При разработке технологии изготовления ППМ с пористой структурой установлено отсутствие технологических вариантов комплексного упразднения брака моделей, керамических оболочек и металлоизделий в ЛВМ. Предложено изготовление ПМ прессованием пластичных и водорастворимых порошков. Изделия в данном случае отличаются отсутствием усадочных деформаций, прогнозируемым распределением физико-механических, технологических и химических свойств, повышенным качеством поверхности и размерно-геометрической точностью, наличием прогнозируемой пористости в структуре прессовки (как открытой, так и изолированной). Изготовленные таким способом ППМ обладают необходимыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами, отличающимися от свойств литых ПМ аналогичного химическо-

го состава, которые зависят от пористости, величины контактной поверхности и характера контакта между частицами [1–3].

При прессовании формируется монолитный каркас пористой структуры из полимерного материала с равномерно распределенными в порах этой структуры частицами водорастворимых компонентов. При введении в порошок воскообразного материала водорастворимых компонентов осуществляется возможность получения ППМ с повышенными физико-механическими свойствами. Процесс получения ППМ складывается из следующих операций: расчета навески и дозировки исходных материалов; засыпки материала в пресс-форму; формования; удаления готовой модели из пресс-формы.

При определении свойств ППМ учитывали такие параметры, как прессуемость, плотность, поверхностная твердость, прочность на разрыв и сжатие, распределение свойств по длине ППМ. Установлено, что физико-механические свойства ППМ обуславливаются содержанием водорастворимой добавки. Предпочтительными свойствами обладают ППМ с 30–40 %-ным содержанием минерального порошка фракции 0,4–0,63 мм с материалом связки фракции 0,63–1,0 мм. На рис. 1 показаны зависимости физико-механических свойств прессованных ППМ при определении их поверхностной твердости, прочности на сжатие и растяжение.

При этом максимальная поверхностная твердость ППМ достигается с использованием равнораспределенных компонентов в смеси и наблюдается в ППМ с 35–40%-ным содержанием растворимого компонента, давлением прессования 1,2–2,0 МПа и составляет 96 ед., прочность на сжатие – 1,6–2,1 МПа, прочность на разрыв – 0,5 МПа. Условие качественного формообразования требует доминирующего содержания полимерных компонентов (т. е. материала связки) над водорастворимыми в ППМ. Чем крупнее фракция водорастворимой добавки в модельном составе, тем меньше количество полимерного компонента необходимо для получения прочной структуры модели, и наоборот. Разработанная технология изготовления ППМ холодным прессованием модельного материала с содержанием водорастворимых компонентов позволяет повысить их размерно-геометрическую точность и точность отливок на 2–4 качества.

Выявлено, что прочность КОФ, полученных по экспериментальным ППМ до и после прокали, выше прочности КОФ, полученных по традиционным ППМ.

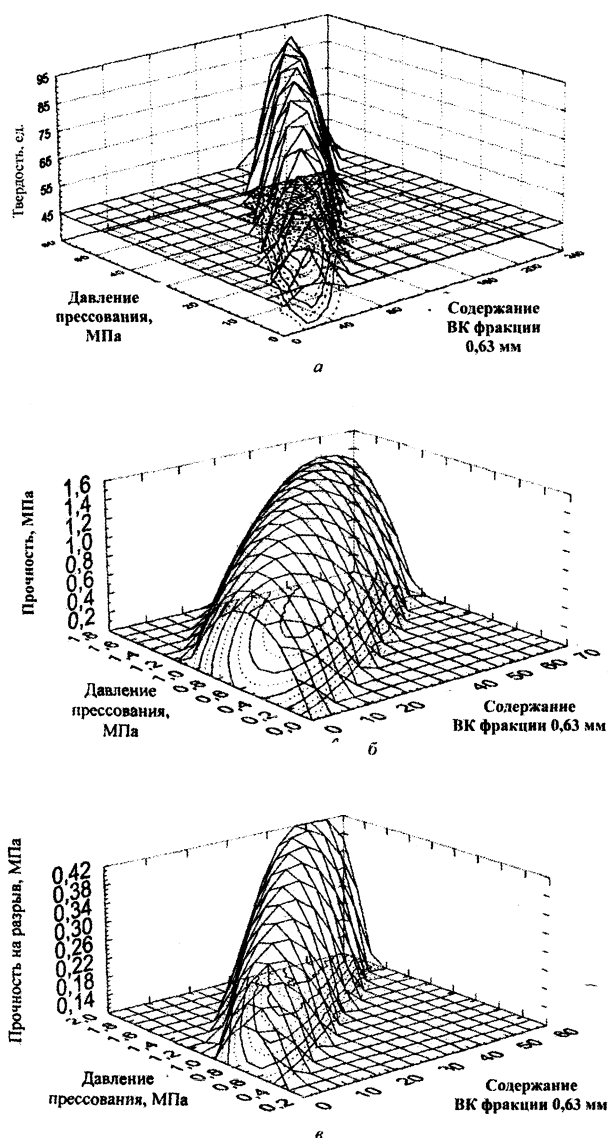


Рис. 1. Физико-механические свойства прессованных ППМ: а – поверхностная твердость; б – прочность на сжатие; в – прочность на растяжение

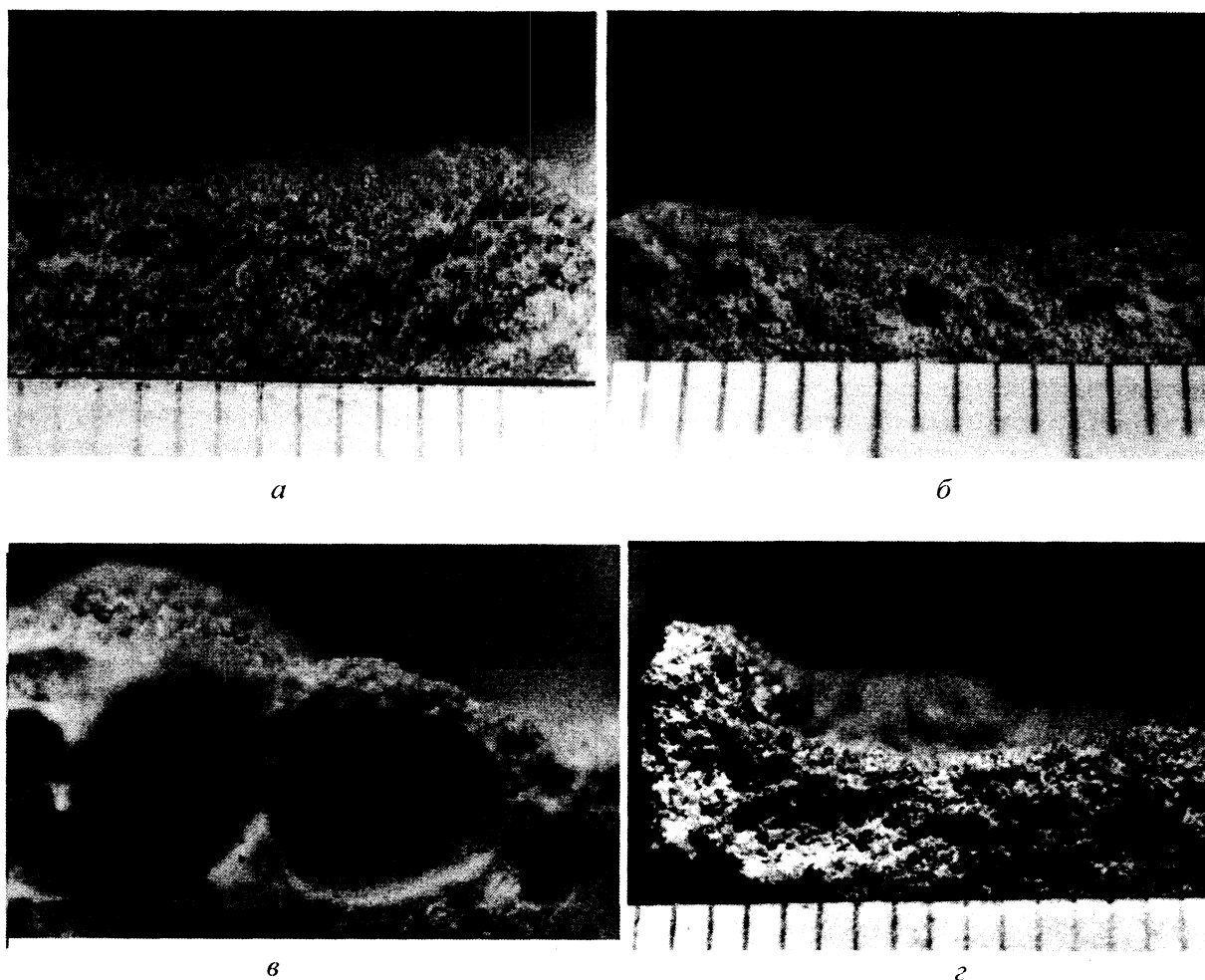


Рис. 2. Структура четырехслойной КОФ в месте излома: *а* – полученной из суспензии со вспученным перлитом; *б* – прокаленная, полученная с порообразующим материалом фракции 0,75 мм во втором и третьем слоях; *в* – прокаленная, полученная с ОП.  $\times 10$ ; *з* – полученная на основе азрированной суспензии

Технологически перспективным является управление пористым строением структуры и технологическими свойствами КОФ при использовании в качестве порообразователя минерального и полимерного порошков, а также аэрации. На рис. 2 показаны структуры КОФ, поры в которых получены различными способами.

Управление пористым строением структур КОФ осуществляли с использованием минерального порошка (МП) фракции до 0,75 мм в качестве наполнителя с различным процентным содержанием и в качестве обсыпного материала разного фракционного состава. Получены структуры слоев КОФ двух видов: с пористостью, рассредоточенной в огнеупорном слое (объемной пористостью), и с пористостью в виде цепочки пор на поверхности сопряжения слоев.

Сравнительный анализ технологических вариантов порообразования показал, что использование МП в качестве наполнителя этилсиликатной суспензии является более технологичным; КОФ с пористостью ( $\Pi_{\text{н}} = 34\%$ ), рассредоточенной во

втором огнеупорном слое, обладают более высокими прочностными свойствами и трещиностойкостью при механическом, высокотемпературном импульсном воздействиях, превышают прочность традиционных оболочек и в большинстве случаев трещиностойкость традиционных форм в 1,5–2,5 раза.

С целью образования пористости в структуре оболочек в качестве обсыпного материала использовали органический порошок (ОП). При этом пористость имеет вид цепочки пор правильной сферической формы на границе сопрягаемых слоев, а управление ее параметрами осуществлялось фракцией ОП.

В результате исследований влияния параметров пористости КОФ при использовании ОП на их технологические свойства выявлено, что такие КОФ обладают низкими в сравнении с традиционными вариантами порообразования прочностными свойствами; использование ОП мелкой (до 1,5 мм) фракции для обсыпки второго слоя способствует разобщению прилегающих слоев КОФ при газифи-

цировании материала, что предотвращает возникновение критических напряжений, приводящих к разрушению оболочек на последующих технологических этапах; использование ОП в обсыпке второго или третьего огнеупорных слоев КОФ в сравнении с традиционными формами повышает трещиностойкость последних в 1,5 раза.

Формирование пористых КОФ может осуществляться из суспензий, приготовленных или обработанных барботажем, что позволяет управлять пористым строением КОФ в узком диапазоне ее степени (34–37%) и, как следствие, технологическими свойствами. При этом КОФ имеют структуру с объемной мелкодисперсной пористостью. При оптимальной (34–37%) степени пористости КОФ, изготовленные по барботажной технологии, имеют превосходящую в 1,5–2,0 раза прочность; удовлетворительную трещиностойкость; меньший показатель разупрочнения при технологической обработке. Барботажная технология изготовления пористых КОФ универсальна и проста в осуществлении, что упрощает ее использование в ЛВМ.

Проведенными исследованиями НДС КОФ с учетом влияния на нее различных условий формообразования и последующего выплавления модели определен характер деформационных процессов в слоях КОФ при ее сушке и выплавлении ППМ. На рис. 3 показаны зависимости деформаций в первом слое трехслойной КОФ по времени процесса.

Характер изменения деформаций в слоях КОФ дает представление о механизме их протекания в оболочке, что позволяет судить о возникающих напряжениях, которые инициируют появление трещин и могут привести к разрушению оболочки. Выявлено, что в процессе сушки огнеупорных слоев происходит накопление деформаций в КОФ.

В момент нанесения второго слоя в первом слое происходит резкое снижение напряжений на 75–78% в результате проникновения в него жидкой составляющей. При нанесении третьего слоя традиционной КОФ также происходит резкое снижение напряжений в результате смачивания суспензией и составляет в первом слое 51–53%, а во втором – 62–64%. При таком характере изменения деформаций увеличивается вероятность зарождения и развития трещин в структуре КОФ. В результате применения ППМ изменяется характер деформаций в слоях КОФ, что приводит к их снижению на 10–14% по сравнению с традиционными ПМ.

Применение пористых КОФ, изготовленных по традиционным моделям, позволило изменить характер деформаций в слоях и снизить их по сравнению с традиционными на 7–10% с промежуточным пористым слоем и диаметром пор 1,6 мм, на 9–13% с промежуточным пористым слоем и диаметром пор 0,63 мм.

Максимальное значение деформаций при нанесении второго слоя пористой КОФ меньше мак-

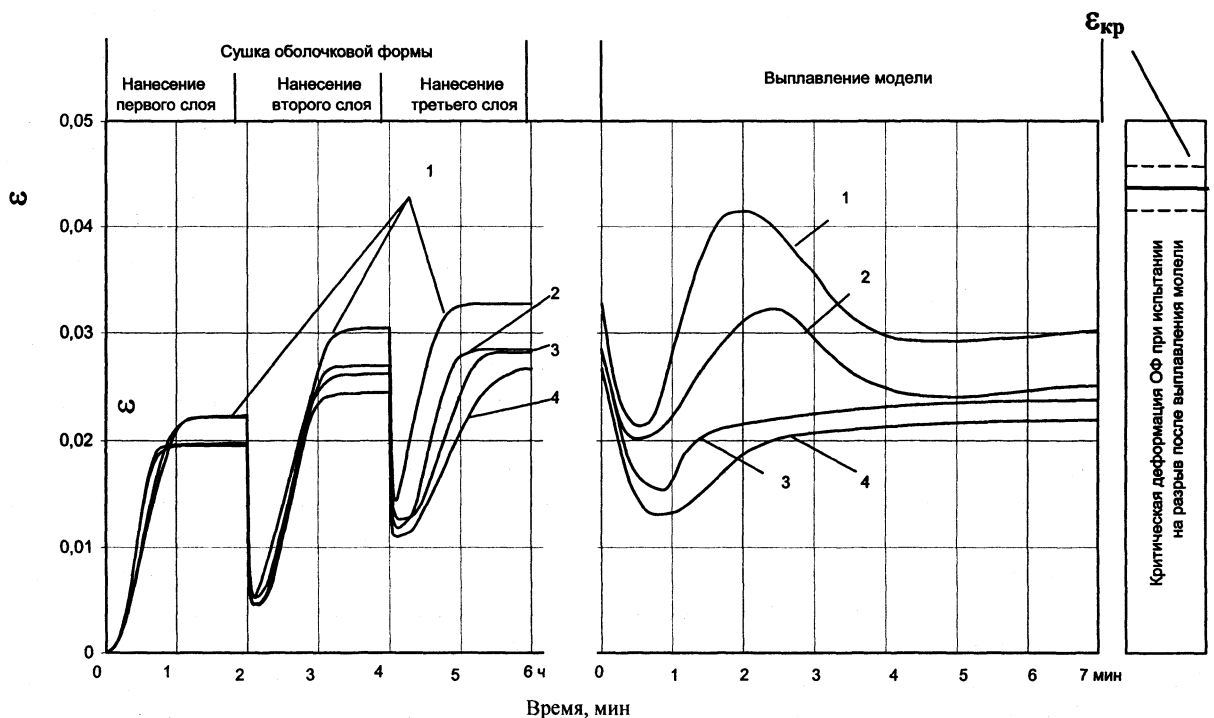


Рис. 3. Деформации в первом слое трехслойной КОФ: 1 – традиционная КОФ и ПМ; 2 – пористая КОФ и ПМ; 3 – традиционная КОФ и ППМ; 4 – пористая КОФ и ППМ

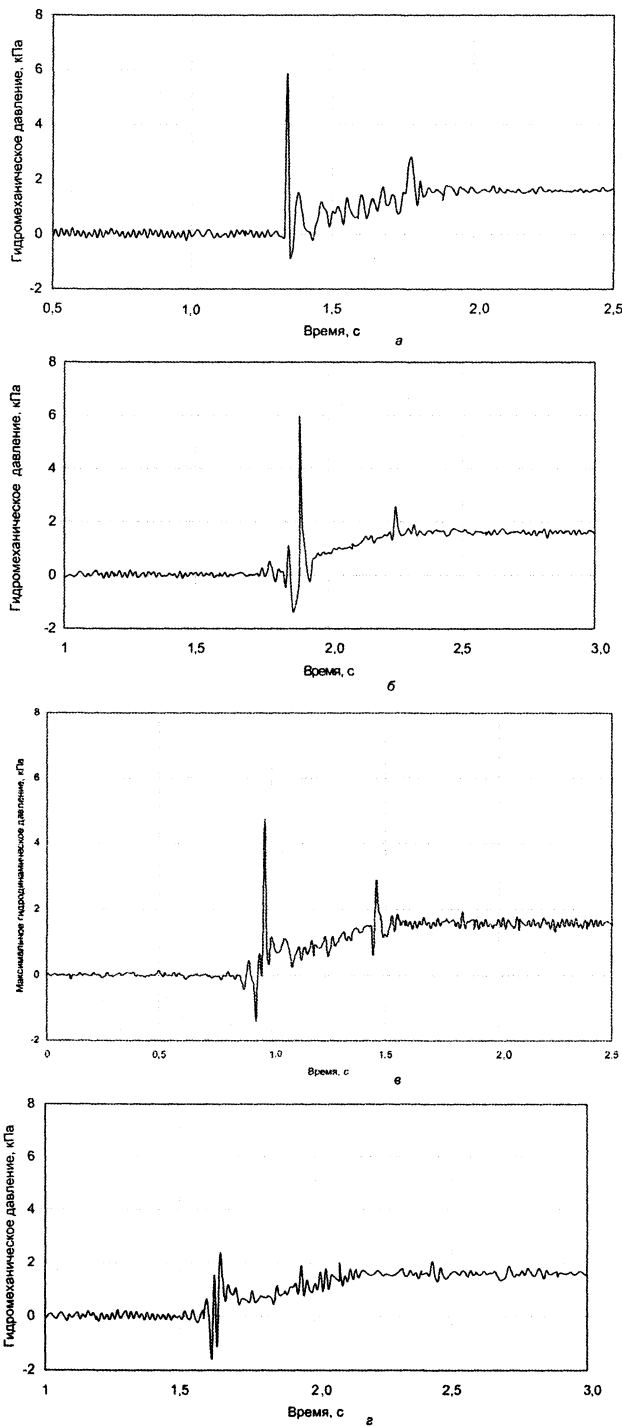


Рис. 4. Изменение гидромеханического давления во время заливки КОФ со струей моделирующей жидкости, направленной в центр стояка: а – с цилиндрическим зумпфом; б – с коническим зумпфом; в – с полусферическим зумпфом; г – с зумпфом в виде половины тора

симального значения деформаций второго слоя традиционной КОФ. Это происходит в результате пропитывания гранул МП жидкой составляющей.

Таким образом, предпочтительным является диаметр пор не более 0,63 мм по причине менее динамичного изменения деформаций в слоях КОФ при ее сушке и снижения деформаций в первом

слое пористой трехслойной КОФ, изготовленной по традиционным ПМ, на 9–13% по сравнению с деформациями в первом слое традиционной КОФ. Отличительной особенностью изменения деформаций в случае применения пористых КОФ, изготовленных по ППМ, является более плавное их увеличение в первом слое при нанесении третьего слоя, происходящее в результате значительного снижения интенсивности сушки. Снижение интенсивности сушки происходит по причине пропитывания ППМ и керамики жидкой составляющей суспензии.

Таким образом, применение пористых КОФ, изготовленных по ППМ, позволяет уменьшить возникающие в оболочке деформации на 14–17%. Кроме того, происходит менее резкое изменение деформаций в КОФ, что снижает возможность трещинообразования.

При погружении традиционной КОФ в горячую воду происходит резкое снижение напряжений, накопленных на стадии формирования оболочки. Затем в результате температурного расширения модели в КОФ возникает резкое увеличение деформаций, которые снижаются по мере расплавления модельного материала. При этом в КОФ возникают деформации вследствие температурного расширения самой оболочки и происходит плавное возрастание деформаций во втором и третьем слоях КОФ из-за меньшей теплопроводности пористой оболочки, чем традиционной.

Таким образом, если скачкообразное изменение деформаций при сушке КОФ имеет длительный характер, то на стадии выплавления традиционной КОФ скачок деформаций происходит за очень малый промежуток времени. При таком характере изменения деформаций в КОФ на стадии выплавления ПМ повышается возможность трещинообразования в структуре оболочки. При выплавлении традиционной ПМ из традиционной КОФ максимальные деформации могут приводить к ее разрушению. Применение ППМ позволяет устранить распирающее воздействие модельного материала на стенки пористой КОФ на этапе его удаления, что повышает их трещиностойкость, а также обеспечить направленное выплавление моделей из КОФ. Изменение деформаций в такой КОФ происходит менее динамично, чем в традиционной.

На практике повышение трещиностойкости КОФ возможно осуществить путем изменения ее конструктивных параметров.

На заливку КОФ поступает с накопленными на предшествующих этапах обработки напряжениями и дефектами. В процессе заливки традиционной КОФ образование трещин в ней и ее разруше-

ние являются следствием термо- и гидродинамического воздействий струи металла. При заливке КОФ важными факторами служат высота заливки, диаметр струи расплава и конструктивное исполнение зумпфа [4, 5].

Экспериментально определено, что конструкция зумпфа оказывает значительное влияние на величину максимального гидродинамического давления струи расплава в КОФ. Так, при заливке в результате гидродинамического удара струи о зумпф КОФ происходит резкое изменение гидродинамического давления, значительно превышающее гидростатическое давление после заливки блока: КОФ с цилиндрическим зумпфом – в 69,1 раз; КОФ с коническим зумпфом – в 64 раза; КОФ с полусферическим зумпфом – в 56,7 раз.

На рис. 4 показано изменение гидромеханического давления струи моделирующей жидкости во время ее заливки КОФ с различной формой зумпфа в центр и боковую поверхность стояка.

Во время заливки КОФ наблюдается повтор гидродинамического удара, что является следствием отражения струи от поверхности зумпфа и ее падения. Такой характер изменения гидродинамического давления во время заливки КОФ расплавленным металлом совместно с термодинамическим воздействием может привести к зарождению и развитию микротрещин в ее структуре или разрушению оболочки.

С целью снижения гидроудара в момент заливки КОФ была разработана конструкция зумпфа, выполненная в виде половины тора, обеспечивающая плавное возрастание гидродинамического воздействия в результате рассечения струи. При этом значение максимального гидродинамического давления в 20,9 раз превышает гидростатическое давление после заливки расплава. Снижение максимального гидродинамического удара при заливке расплава приводит к уменьшению вероятности образования трещин и сколов керамики. Применение зумпфа в виде половины тора позволило снизить гидродинамическое давление в КОФ при ее заливке на 62–64% по сравнению с полусферическим зумпфом и на 69–72% по сравнению с цилиндрическим.

Определены зависимости максимального гидродинамического давления струи моделирующей жидкости от ее диаметра и высоты заливки КОФ, которые описывается следующими уравнениями:

для КОФ с цилиндрическим зумпфом:

$$P = -947117,5kH + 337253,6kH^{0,5} + 750485,4Hk^{0,5};$$

для КОФ с коническим зумпфом:

$$P = -969018,6kH + 332439,9kH^{0,5} + 751416,8Hk^{0,5};$$

для КОФ с полусферическим зумпфом:

$$P = -954118,2kH + 286187,3kH^{0,5} + 748913,8Hk^{0,5};$$

для КОФ с зумпфом в виде половины тора:

$$P = 343779,2kH + 84683,5kH^{0,5} + 282106,4Hk^{0,5},$$

где  $k = D_c / D_{ст}$  ( $D_c$  – диаметр струи;  $D_{ст}$  – диаметр стояка).

В настоящее время в производстве применяют КОФ с прочностью на изгиб  $\sigma_{и} = 3-10$  МПа. Такая прочность КОФ является достаточной, чтобы выдержать гидростатическое давление расплава без опорного наполнителя. В случае применения КОФ с зумпфом в виде половины тора максимальное гидродинамическое давление струи металла составляет 8–13% от прочности оболочки, что позволяет значительно снизить вероятность разрушения ОФ при заливке [6].

С помощью метода математического моделирования получена картина НДС КОФ, которая использовалась при разработке мер снижения опасных напряжений в форме и брака отливок по вине КОФ. Решение задачи для заливки КОФ с различной интерпретацией пористых слоев расплавом Ст45Л показало, что наибольшим градиентом  $\sigma_{22}$  обладают оболочки с внутренними пористыми слоями. Возникающие напряжения значительно превышают допустимые значения и провоцируют разобщение слоев.

Разобщение слоев происходит по фронту пор структуры КОФ таким образом, что образуется оболочка в оболочке. При этом целостность формы не нарушается. Вследствие действия данного механизма релаксации напряжений в структуре формы последние приобретают значения существенно ниже допустимых, что предотвращает растрескивание КОФ и ее разрушение.

В ходе анализа размерно-геометрической точности ППМ и отливок, полученных традиционным и экспериментальными методами, рассмотрены возможности реализации технологии изготовления ППМ в условиях производства. Установлено, что ППМ, полученные холодным прессованием модельного материала, отличаются от традиционных ПМ отсутствием внешних усадочных дефектов, меньшими радиусами скруглений внешних и внутренних углов, образованных взаимно перпендикулярными поверхностями модели. Радиус скругления взаимно перпендикулярных поверхностей ППМ 0,8 мм, что на 0,6 мм меньше, чем у традиционных ПМ.

Экспериментально установлено, что размерно-геометрическая точность ППМ с 30–40%-ным содержанием водорастворимых компонентов соот-

ветствует 9–10-му качеству, что выше, чем у традиционных ВМ, точность которых соответствовала 11–14-му качеству. Сравнительным анализом определено, что отливки, полученные по экспериментальным ППМ, соответствуют 10–12-му качеству, что на 2–4 качества выше, чем у традиционных отливок.

Опробование технологии изготовления КОФ с промежуточным пористым слоем показало их высокую стойкость к растрескиванию на всех этапах технологической обработки.

Анализ макроструктуры изломов КОФ показал, что после прокаливания в опорном наполнителе как традиционных КОФ, так и КОФ с экспериментальным зумпфом происходит непрогнозируемое отслаивание внутреннего слоя керамики; после прокаливания и заливки пористых КОФ без опорного наполнителя данного эффекта не наблюдается, образующиеся трещины локализуются в порах промежуточного слоя, что предотвращает ее разрушение. Опробование показало, что зали-

ваемость КОФ с экспериментальным зумпфом без опорного наполнителя составляет 32–40% в отличие от традиционных КОФ, оболочки не разрушаются при попадании первой порции металла. КОФ с пористостью промежуточного слоя 34–37% обладают высокой трещиностойкостью при заливке без опорного наполнителя. Заливаемость форм металлом составила 88–94%. При этом имеются случаи прорыва металлом зумпфа КОФ. Установлено, что наибольшей 94–100%-ной стойкостью к заливке металлом без опорного наполнителя обладают шестислойные керамические оболочки с пористым третьим слоем и зумпфом в виде половины тора.

Таким образом, для снижения себестоимости литья, улучшения свойств оболочковых форм и получения отливок повышенной размерно-геометрической точности в ЛВМ целесообразно применение технологии изготовления КОФ с промежуточным пористым слоем и зумпфом в виде половины тора по ППМ с пористостью 30–40%.

#### Литература

1. Пат. РФ 2188735 / И. Г. Сапченко, С. Г. Жилин, Т. В. Костина, С. А. Некрасов. Способ изготовления выплавляемых моделей.
2. Жилин С. Г., Сапченко И. Г., Комаров О. Н. Определение свойств пористых удаляемых моделей // Литейное производство. 2006. № 7. С. 29–30
3. Сапченко И. Г., Жилин С. Г., Штерн М. В. Точность удаляемых моделей и качество оболочковых форм в литье по выплавляемым моделям // Литейное производство. 2005. № 2. С. 20–22
4. Пат. РФ 2218234 / И. Г. Сапченко, С. Г. Жилин, С. А. Некрасов, М. В. Штерн. Литниково-питающая система.
5. Некрасов С. А., Сапченко И. Г., Жилин С. Г., Комаров О. Н. Влияние конструкции оболочковой формы на гидродинамическое давление расплава // Литейное производство. 2006. № 7. С. 22–24
6. Сапченко И. Г., Жилин С. Г., Комаров О. Н., Штерн М. В. Математическое моделирование процесса затвердевания отливки в пористой оболочковой форме // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. физ.-мат. науки. 2006. № 42. С. 193–195.