

## ПОЛУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-СЛОЖНЫХ ОТВЕРСТИЙ В КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОТЛИВКАХ ИЗГОТОВЛЯЕМЫХ ЛИТЬЕМ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

А.С. Горюхин, Е.С. Гайнцева, И.И. Шайхутдинова

*В статье приведен способ изготовления фрагмента сложного участка керамической оболочки, формирующего отверстие в отливке. Приведена методика анализа напряженно-деформированного состояния элементов формы при заливке ее сплавом и расчета прогиба стержня. Рассмотрены термические условия деформации стержня в форме.*

*Ключевые слова: отливка, стержень, прогиб стержня, прототипирование.*

Метод литья по выплавляемым моделям, благодаря преимуществам по сравнению с другими способами изготовления отливок, получил значительное распространение в машиностроении. Изготовление крупногабаритных отливок литьем по выплавляемым моделям, переменного сечения с развитыми внутренними полостями сложной конфигурации основная тенденция развития литейного производства. Организованный на базе ОАО «УМПО» Центр технологической компетенции алюминиевого и титанового литья (ЦТК АТ) планирует начать серийный выпуск продукции в 2017 году. В настоящее время центр готовится к получению нового оборудования, позволяющего к указанному сроку набрать мощность выпуска до 600 тонн алюминиевого литья и 105 тонн титанового литья в год. Чтобы литые детали соответствовали конструкторским требованиям, предъявляемым к авиационным двигателям нового поколения, ЦТК АТ нацелен на освоение инновационных технологий. Предполагается, что номенклатура по титановому литью составит более 1500 позиций, по алюминиевому литью – около 1000 позиций [5].

Одной из проблем, при получении крупногабаритной отливки со сложными отверстиями малого диаметра, является формирование сложных отверстий в форме, полученной литьем по выплавляемым моделям. Отверстия в отливках, как правило, формируются либо керамическими стержнями, либо облицовкой, путем нанесения суспензии и обсыпкой огнеупорным материалом различных фракций (для отверстий малого диаметра в модели отливки предусматриваются технологические окна, позволяющие получить качественную форму).

Основной сложностью при облицовке

отверстия сложной формы и малого диаметра, является сложность равномерного нанесения как связующего, так и обсыпочного материала. Для облицовки модели с помощью роботизированной установки необходимо точно задать геометрию движения манипулятора, выбор которого представляет определенную сложность на этапе теоретической разработки процесса. Облицовочный материал, с высокой степенью вероятности, будет скапливаться на участках изменения геометрии отверстия в модели.

Предложено изготавливать пространственно-сложные отверстия в отливках стержнями, полученными в специально изготовленных моделях, представляющих формы, полученные методом прототипирования (стереолитографического лазерного спекания) [1], внутренняя полость которых соответствует отверстию в отливке.

На рисунке 1 показана модель для формирования сложного стержня.



Рисунок 1 – Модель трубки для изготовления сложного стержня

Во внутренней полости модели формируется стержень, путем послойного нанесения керамического покрытия из 10-12 слоев. Качество получаемых стержней обеспечивается возможностью пространственного вра-

## ПОЛУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-СЛОЖНЫХ ОТВЕРСТИЙ В КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОТЛИВКАХ ПОЛУЧАЕМЫХ ЛИТЬЕМ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

щения трубки в любом направлении, обеспечивающем равномерное распределение как суспензии, так и обсыпочно материала. Закрепление стержня в форме осуществляется знаками, которые формируются в отделяемых трубочках из того же материала, удлиняющих модель на 20 мм с каждой стороны. В трубочках предусматриваются надрезы продольные и по окружности в месте соединения с основной моделью.

После формирования стержня, трубочки отделяются механическим путем, при повышенной температуре. Полученный фрагмент со стержнем устанавливается в пресс-форму всей модели и заливается модельным составом. При этом модельный состав проплавляет фрагмент модели со стержнем и соединяется с ним.

В дальнейшем, полученная модель облицовывается по технологии ЛВМ [2], при этом используются те же материалы, что и для получения стержня. Стержень фиксируется в оболочке выступающими знаками и сохраняет свое пространственное расположение в форме. Удаление модельной массы, после получения формы осуществляется по заданному режиму, при этом часть модельной массы фрагмента (полученного из другого материала) может остаться, но она выгорит при прокаливании формы.

На рисунке 2 представлен стержень после обжига (формовка в короб с песком и прокалка в печи при температуре 1000 °С в течение трех часов), представляющий собой прочную керамическую трубку.



Рисунок 2 – Керамический стержень после обжига

Достоинством этого способа является возможность получения пространственно-сложных отверстий небольшого диаметра (25–35 мм), протяженностью порядка 300 мм, без применения технологических окон, как в случае облицовки внутренней полости по технологии получения формы, так и без применения пресс-форм, как в случае получения отверстий с помощью спекаемых стержней.

В процессе заливки металла на стержень, формирующий отверстие, действуют температурные факторы, приводящие к его напряженно-деформированному состоянию. Схема нагрузок на стержень, возникающих при заливке формы представлена на рисунке 3. Стержень жестко закреплен в форме. Основным силовым фактором выступает осевая сила, сжимающая стержень, которая возникает вследствие разных термических расширений формы при её неравномерном прогреве.

Упрощенно стержень можно представить в виде конструкции из четырех прямолинейных элементов, жестко соединенных между собой. Конструкция стержня предполагает возникновение в нем силовых факторов в виде осевых сил ( $P_x, P_y, P_z$ ), изгибающих ( $M_x, M_y, M_z$ ) и крутящих моментов ( $T_x, T_y, T_z$ ). В точке 2 ожидается наибольшее искажение геометрии внутренней полости отливки, вследствие прогиба и разворота стержня. Поэтому при проектировании технологии изготовления отливки необходимо подбирать технологические факторы, препятствующие смещению, развороту и прогибу стержня в отливке, а также изготавливать форму из материалов, с высоким пределом прочности как при изгибе, так и при сжатии.

Процесс получения заданной пространственной точности отливки рассматривается с точки зрения системы стержень–отливка–оболочка.

К основным элементам  $a_i$  системы можно отнести: стержень, отливку, оболочку.

Каждый  $a_i$  элемент характеризуется  $m$  свойствами  $S_{i1}...S_{im}$  (состав, температура, термическое расширение, теплопроводность и т.д.), которые однозначно определяют его в данной системе. Совокупность всех  $m$  свойств элемента определяют состояние элемента  $S_i = (S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, \dots, S_{ik}, \dots, S_{im})$ .

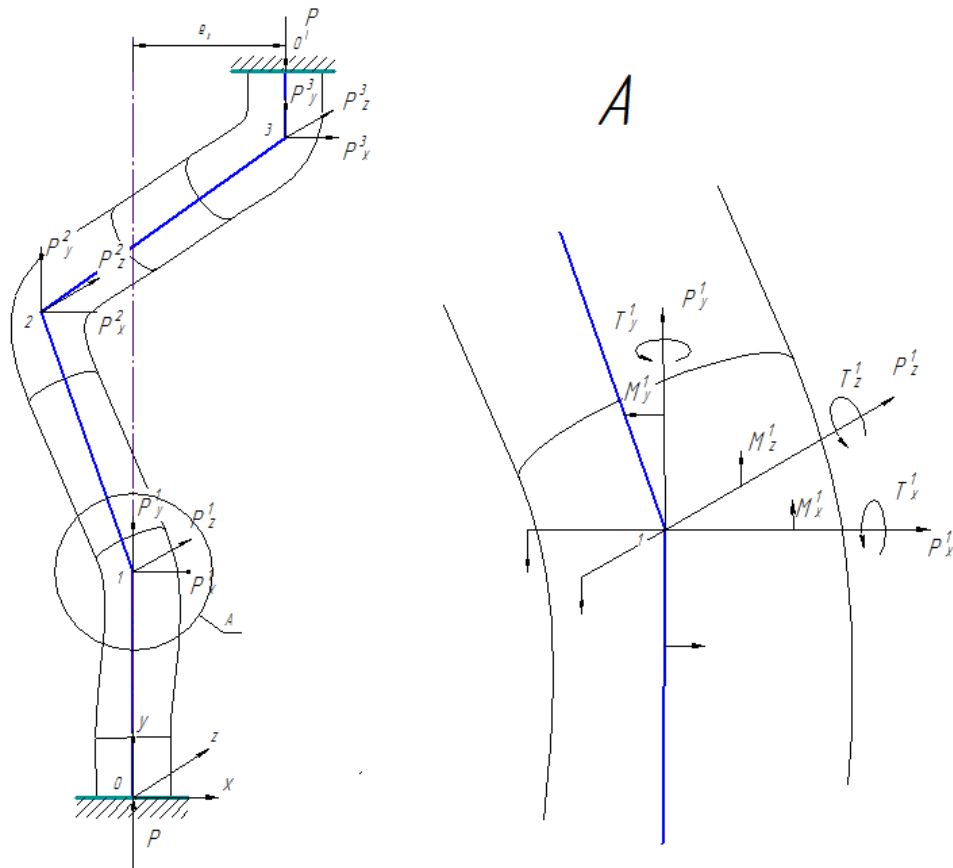


Рисунок 3 – Схема нагрузок на стержень, возникающих при заливке формы

Рассматриваемый стержень (рисунок 3) относится к стержням типа стержень-балка, так как размеры поперечного сечения (рисунок 4) в двух взаимно перпендикулярных направлениях не отличаются друг от друга. Поэтому, в соответствии с гипотезой плоских сечений, деформации при изгибе и кручении можно считать взаимно независимыми.

Геометрические характеристики сечения стержня, представленного на рисунке 4:

- наружный диаметр  $a = 30$  мм;
- диаметр отверстия  $a_1 = 7$  мм;
- площадь  $F = 668,4$  мм<sup>2</sup>;
- осевые моменты инерции  $J_x = J_z = 39642,9$  мм<sup>4</sup>.

Высота стержня равна  $b = 290$  мм.

Математическая модель определения прогиба стержня [3] представляет собой сложное уравнение, ее решение требует выполнения множества промежуточных операций (вычисление силовых факторов, коэффициентов закрепления, геометрических характеристик поперечных сечений).

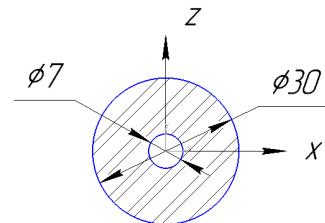


Рисунок 4 – Эскиз поперечного сечения стержня

Известно, что при заливке сплава, кристаллизации и последующем остывании отливки неизбежно возникает неравномерное распределение температуры, что является одной из главных причин возникновения напряженно-деформированного состояния отливки и влияет на деформацию стержня.

Теоретические исследования и решение задачи о деформации керамических стержней [4] при литье позволило установить зависимости прогиба стержней от воздействия различных технологических факторов [3].

При расчете были приняты следующие допущения:

ПОЛУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-СЛОЖНЫХ ОТВЕРСТИЙ В КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОТЛИВКАХ ПОЛУЧАЕМЫХ ЛИТЬЕМ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

1. Материал формы подчиняется закону упругости. Наличие пор в материале формы принципиально не меняет характера деформирования.

2. Коэффициент термического расширения и модуль упругости формы не зависят от температуры.

3. Площадь и форма поперечного сечения стержня по длине постоянны.

4. Динамическое воздействие струи металла на стержень из рассмотрения исключаются.

Рассчитаем гибкость стержня по формуле:

$$\lambda = \frac{\mu b}{\sqrt{\frac{J_x}{F}}}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент закрепления стержня (для закрепления, представленного на рис. 3  $\mu = 0,5$  – жесткое закрепление стержня).

В результате получим  $\lambda = 18,83$ .

Критическая сила потери устойчивости стержня  $P_\omega$  по Эйлеру рассчитывается по формуле:

$$P_\omega = \frac{\pi^2 EJ_x}{\mu^2 b^2}, \quad (2)$$

где  $E$  – модуль упругости материала стержня, Н/м<sup>2</sup>.

Критическая осевая деформация по Эйлеру:

$$\varepsilon_{кр.э.} = \frac{P_\omega}{FE} = \frac{\pi^2 EJ_x}{\mu^2 b^2 FE} = \frac{\pi^2}{\lambda^2}. \quad (3)$$

В итоге получим  $\varepsilon_{кр.э.} = 0,028$ .

Уравнение прогиба стержня может быть записано в виде:

$$\omega = \left\{ f_0 + \frac{Peb^2}{\pi^2 EJ_x} + \frac{b^2 M_T}{\pi^2 EJ_x} + \frac{b^2 M_M}{\pi^2 EJ_x} \right\} \frac{1}{1 - \frac{3\varepsilon_0}{\varepsilon_{кр.э.}}} \quad (4)$$

где  $f_0$  – величина первоначального прогиба, мм;

$\frac{Peb^2}{\pi^2 EJ_x}$  – прогиб, возникающий за счет эксцентричного приложения осевой силы, мм;

$P$  – осевая сила, Н;

$\frac{b^2 M_T}{\pi^2 EJ_x}$  – прогиб, возникающий в результате напряжений от неравномерного распределения температуры по сечению стержня, мм;

$\frac{b^2 M_M}{\pi^2 EJ_x}$  – прогиб от воздействия механического момента, мм;

числового момента, мм;

$\frac{1}{1 - \frac{3\varepsilon_0}{\varepsilon_{кр.э.}}}$  – влияние величины осевой деформации на прогиб стержня;

$M_T$  – момент, возникающий в стержне вследствие неравномерности температурного поля прогрева стержня и оболочки, кН·мм;

$M_M$  – момент, возникающий в стержне вследствие действия механической нагрузки, кН·мм;

$e$  – расстояние от естественной оси стержня до оси приложения равнодействующей осевой силы, мм;

$\varepsilon_0$  – осевая деформация стержня (оболочки).

Величина первоначального прогиба стержня, как правило, задается конструктором и для рассматриваемого стержня она равна 96 мм. С увеличением значения первоначального прогиба стержня значительно увеличивается прогиб его в отливке.

Анализ уравнений показывает, что степень влияния таких факторов как первоначальный прогиб, эксцентricность приложения осевой нагрузки, термические и механические моменты зависят от уровня осевой деформации стержня. По мере увеличения температуры и разности термических расширений в форме осевая деформация стержня будет возрастать. С увеличением этой деформации значение перечисленных выше факторов будет усиливаться, поэтому осевая деформация является одним из определяющих факторов.

На производстве всегда имеет место разница термических расширений в форме, следовательно, учет уровня осевой деформации имеет важное значение.

Деформация в форме может проявиться при следующих термических условиях:

1) неравномерный прогрев формы по высоте;

2) неравномерный прогрев формы по толщине;

3) неравномерный прогрев формы по ширине.

Любое из перечисленных технологических условий будет вызывать дополнительный прогиб и разворот стержня, которые могут быть заданы конструктором или возникнуть в процессе изготовления стержня.

При кристаллизации и остывании отливки неизбежно возникает неравномерное распределение температуры в форме, которое является одной из основных причин возникновения напряжений и деформаций. В большинстве случаев неравномерному распределению температуры способствует геометрическая форма самой отливки. Тонкие части отливки охлаждаются быстрее массивных, которые сохраняют более высокую температуру до конца охлаждения.

Таким образом, для оценки величины прогиба стержня, необходимы данные о распределении температур по толщине, высоте и ширине в форме.

Форма прогревается неравномерно и средняя температура её в разных сечениях различна. Распределение температуры по высоте формы определяет среднюю температуру в фиксированный момент.

Разность температуры по толщине формы в ряде случаев может вызвать прогиб стержня или способствовать его увеличению.

В результате неравномерного нагревания и охлаждения в различных местах формы будут возникать растягивающие и сжимающие напряжения. В зоне, где температура выше средней – сжимающие, а где ниже средней – растягивающие. Прогиб стержня будет происходить в сторону больших температур.

Неравномерность распределения температуры по ширине формы оказывает влияние на прогиб стержня. При наличии изгибающих моментов прогиб стержня может произойти в результате крутильной потери устойчивости.

С увеличением температурного перепада по ширине в форме, изгибающий момент увеличивается, что приводит и к увеличению прогиба стержня.

При несимметричном расположении стержня относительно его оси результирующая осевая сила  $P$  находится на расстоянии  $e_x$  от оси. Независимо от распределения температуры в стержне результирующая сила  $P$  будет вызывать изгибающий момент.

Таким образом, приведенная методика расчета позволяет прогнозировать ожидаемый прогиб стержня при заданных значениях температурного поля отливки при заливке и затвердевании. Выполнен расчет прогиба для рассмотренного выше стержня. Выполненный расчет показал, что при жестком закреплении знаков в форме стержень в опасном сечении будет дополнительно прогибаться на 1,89 мм.

Выполненная работа показывает принципиальную возможность получения сложных керамических стержней с искривлением в пространстве и поворотами в различных направлениях относительно основных осей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лаборатория быстропрототипирования УГАТУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rputu.ru>. Дата обращения: 09.01.2015.
2. Литье по выплавляемым моделям / В. Н. Иванов [и др.] ; под ред. Я. И. Шкленника, В. А. Озерова .– 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1984 .– 408 с.
3. Павлинич, С.П. База знаний экспертной системы получения качественной отливки лопатки турбин / С. П. Павлинич, А. С. Горюхин, Е. С. Гайнцева // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета .— 2013 .— Т. 17, № 1 .— С. 86-91 .
4. Матренин С.В., Слосман А.И. Техническая керамика: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. –75 с.
5. ОАО «УМПО» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.umpro.ru>. Дата обращения: 09.01.2015.

**Горюхин Александр Сергеевич** – Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра «Машины и технология литейного производства», к.т.н, доцент, тел. 8(3472) 273-77-55, e-mail: [GoruhinAS@yandex.ru](mailto:GoruhinAS@yandex.ru).

**Гайнцева Екатерина Сергеевна** – Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра «Машины и технология литейного производства», к.т.н, ст. преподаватель, тел. 8(3472) 273-77-55, e-mail: [GaintsevaES@yandex.ru](mailto:GaintsevaES@yandex.ru).

**Шайхутдинова Ирина Ириковна** – Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра «Машины и технология литейного производства», аспирант, тел. 8(3472) 273-77-55, e-mail: [peacelife@mail.ru](mailto:peacelife@mail.ru).