



## ▶ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗЛОЖНИЦ ДЛЯ СЛИТКОВ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

**А**нализ причин разрушения изложниц показывает, что в среднем 40-45% изложниц отбраковывают из-за образования трещин, 40-45% – из-за разгара внутренней поверхности, 10-15% – из-за разрывов и около 5% выходят из строя из-за механических повреждений. Мелкие изложницы для спецсталей в 70-80% случаев отбраковывают из-за трещин.

Образование трещин в изложницах происходит в результате достижения металлом предельных величин деформации и напряжения, которые зависят от структуры металла, температуры нагрева и условий нагружения и реализуются деформацией сдвига в зонах концентрации напряжений.

В условиях быстрого нагружения трещина образуется при большом напряжении и малой деформации, а при медленном нагружении разрушение вызывается малой нагрузкой и значительной деформацией.

В настоящее время признано, что компьютерное моделирование сложных задач теплообмена и напряженного состояния материалов, динамики пластических явлений часто оказывается более дешевым, чем экспериментальные исследования. Компьютерное моделирование позволяет избежать проблем,

связанных с возмущениями изучаемых процессов датчиками, применяемыми в экспериментах, а также с очень малыми или большими размерами исследуемых объектов, с очень высокими или низкими температурами и т.п.

Современные программные продукты обеспечивают моделирование литейных процессов в отливке, а также расчет напряженного состояния отливки после ее охлаждения.

Компьютерное моделирование напряженного состояния изложницы было произведено при помощи программы СКМ ЛП "Полигон" и деформационного модуля СКМ ЛП "Полигон". Масса изложницы составляла 1150 кг, черный вес отливки – 1450 кг, толщина стенки – 85-100 мм, материал – серый чугун с пластинчатым графитом. Изложницы используются для отливки слитков массой 670 кг из специальных легированных сталей с температурой разливки до 1700°C, с повышенной скоростью наполнения слитка и продолжительной его выдержкой в изложнице, что обусловлено невысокой теплопроводностью легированных сталей. Основной причиной выхода таких изложниц из строя является образование продольных трещин в верхней зоне. [1]

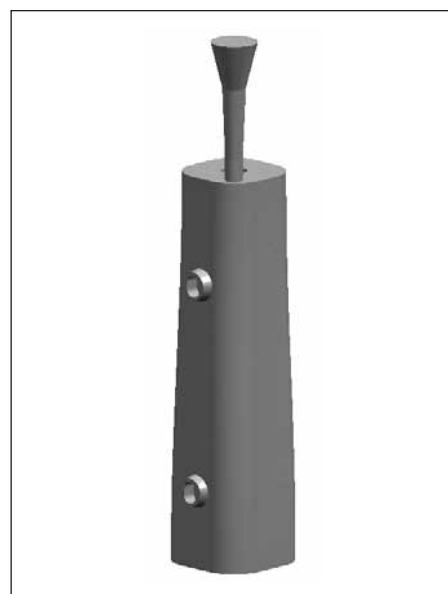


Рис. 1. 3D-модель изложницы, использованная для расчета напряженного состояния после изготовления

В основу расчета была положена 3D-модель изложницы с учетом литейных припусков и литниково-питающей системы (рис. 1).

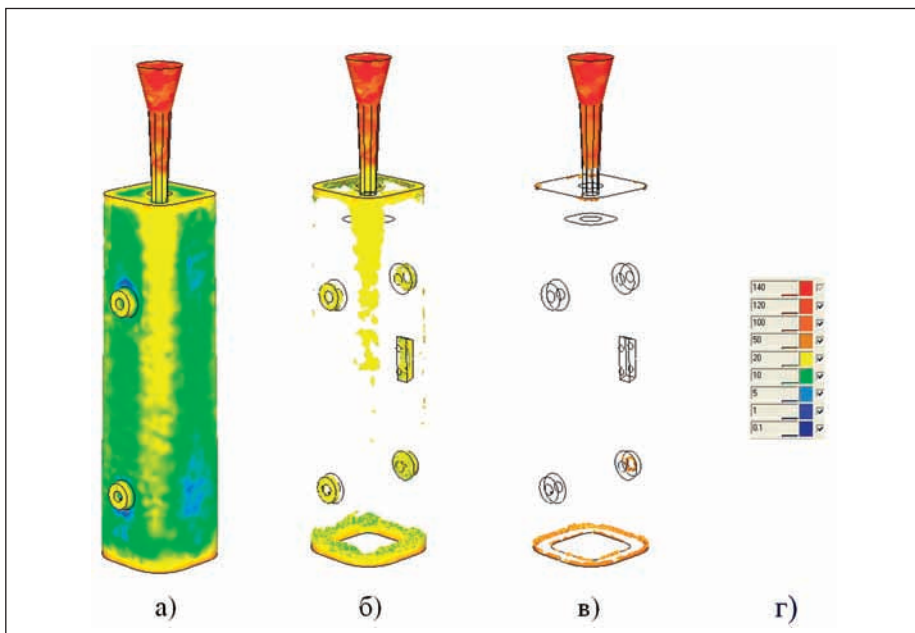


Рис. 2. Результат расчета напряжений в изложнице при помощи деформационного модуля СКМ ЛП "Полигон":  
 а) остаточные напряжения в изложнице, возникающие при остывании в форме до 200°С;  
 б) остаточные напряжения более 20 МПа;  
 в) остаточные напряжения более 50 МПа;  
 г) цветовая шкала напряжений в МПа

В любой отливке в процессе затвердевания и последующего охлаждения возникают напряжения, которые можно классифицировать как усадочные и температурные, причем некоторые из них являются временными, другие – остаточными. Возникающие напряжения являются причиной образования горячих и холодных трещин и искривления отливок.

Механические напряжения и деформации возникают в отливке вследствие препятствий ее усадке со стороны формы, но чаще – со стороны стержня. Такие напряжения зависят главным образом от конструкции отливки и литейной формы, а также от свойств чугуна и технологии производства. Важной особенностью механических напряжений является то, что они возникают как реакция на воздействия внешних сил (по отношению к отливке). Однако при устранении таких воздействий (в результате извлечения отливки из формы и удаления из нее стержней) они могут исчезать, что на практике наблюдается очень часто. Если под влиянием механических напряжений отливка оказывается пластически деформированной, часть напряжений в ней может сохраняться неопределенное время.

Как известно, в процессе затвердевания в теле отливки температуры распределяются неравномерно, что обусловлено

разностенностью, разнообразным расположением литников и прибылей, свойствами формовочных материалов, красок и другими факторами. Вследствие этого в отливке возникают термические напряжения и деформации.

**Компьютерное моделирование позволяет избежать проблем, связанных с возмущениями изучаемых процессов датчиками, применяемыми в экспериментах, а также с очень малыми или большими размерами исследуемых объектов, с очень высокими или низкими температурами и т.п.**

Применяемая программа для расчета напряженного состояния изложницы СКМ ЛП "Полигон" и деформационный модуль СКМ ЛП "Полигон", разработанный А.В. Монастырским [2, 3, 4], опираются на реальную физику процессов с учетом механических, физических и теплофизических свойств материала и формы.

СКМ ЛП "ПолигонСофт" позволяет произвести обработку некоторых наиболее важных технологических параметров не на реальной отливке, а на ее компьютерной модели, что снижает затраты на проектирование и доводку литейной технологии. Данная программа производит расчет тепловых процессов, происходящих в отливке с момента полной заливки формы до полного ее затвердевания.

При моделировании были приняты следующие исходные данные:

- свойства чугуна с пластинчатым графитом:
  - плотность ( $\rho$ ) – 6950 кг/м<sup>3</sup>,
  - теплоемкость ( $c$ ) – 838 Дж/(м·К),
  - теплопроводность ( $\lambda$ ) – 42,00 Вт/м·К,
  - теплота затвердевания – 25000 Дж/кг;
- свойства формы:
  - теплоемкость ( $c$ ) – 1080.000 кДж/(м<sup>3</sup>·К),
  - теплопроводность ( $\lambda$ ) – 1.28Вт/(м·К);
- исходные условия:
  - температура заливки чугуна – 1280°С,
  - температура формы – 20°С,
  - окончание расчета – остывание отливки в форме до 200°С.

Расчет напряженного состояния изложницы производился в два этапа.

На первом этапе осуществлялось моделирование процесса затвердевания отливки в форме с учетом перечисленных выше свойств и условий в СКМ ЛП "Полигон". Результат расчета – файл тепловых процессов при затвердевании.

На втором этапе в деформационном модуле СКМ ЛП "Полигон" рассчитывались напряжения в изложнице. При этом использовался файл тепловых процессов, полученный в предыдущем расчете, а также модуль Юнга ( $E$ ) – 1.3·10<sup>5</sup> МПа; коэффициент Пуассона ( $\mu$ ) – 0,27; КЛТР ( $\alpha$ ) – 1/К; предел упругости ( $\sigma_{0,05}$ ) – 80 МПа и предел прочности ( $\sigma_B$ ) – 300 МПа. На основании этих данных программа производила расчет напряжений, возникающих в теле изложницы во время остывания. Результат такого расчета, осуществленного при помощи деформационного модуля СКМ ЛП "Полигон", представлен на рис. 2.

Из рис. 2, б видно, что зонами наибольшей концентрации остаточных напряжений в отливке изложницы являются: нижний торец (в рабочем со-

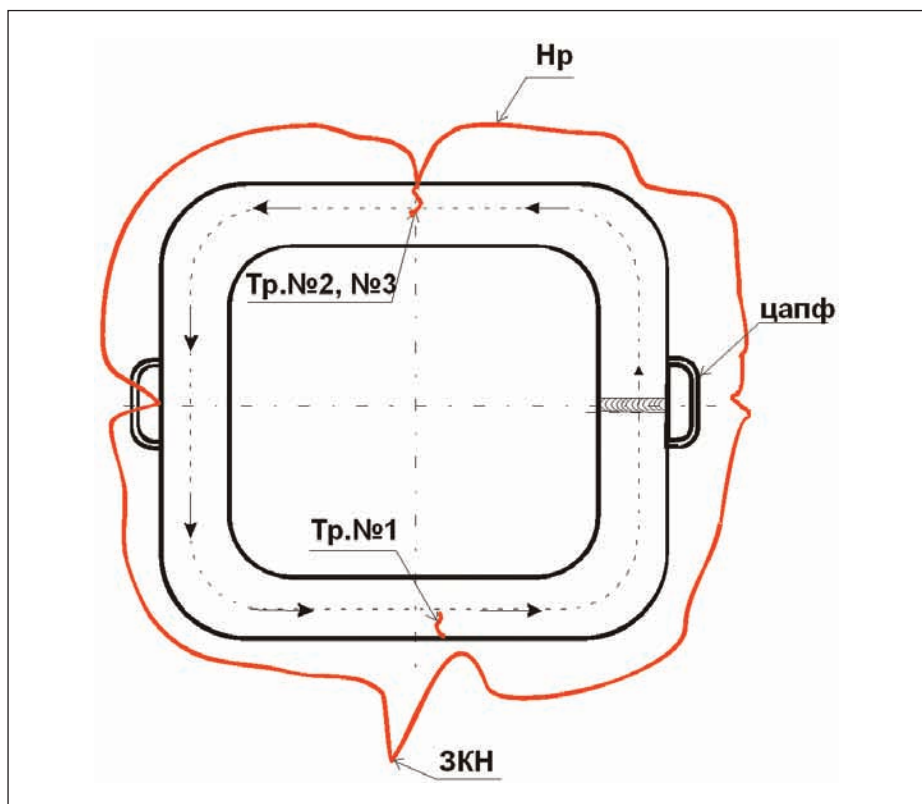


Рис. 3. Характерное распределение поля  $H_p$  вдоль периметра изложницы:  
Тр. № 1, № 2, № 3 – места образования трещин на трех изложницах соответственно

стоянии при заливке слитка – это верхний торец изложницы), места установки цапф и верхний торец отливки. Остаточные напряжения в нижнем торце отливки существенно выше, чем в других зонах (рис. 2, в), при этом зоны максимальной концентрации остаточных напряжений расположены симметрично на противоположных сторонах изложницы и смещены ~ на  $90^\circ$  относительно расположения цапф изложницы.

Сравнение полученных расчетных данных с результатами замера напряженного состояния трех таких изложниц методом магнитной памяти металла показало их полное совпадение.

На рис. 3 представлено характерное распределение поля  $H_p$  вдоль периметра изложниц в исходном состоянии (перед заливкой стали), которое соответствует распределению остаточных напряжений (ОН) на наружной поверхности.

Из рис. 3 видно, что зоны максимальной концентрации ОН (ЗКН) расположены симметрично на противоположных сторонах изложниц и смещены ~ на  $90^\circ$  относи-

тельно расположения цапф корпуса изложницы. Все исследуемые изложницы выдержали практически одинаковое количество наливов до образования трещин.

**Использование компьютерного моделирования для определения напряженного состояния отливок позволяет определить величину и зоны максимальной концентрации напряжений, возможные места образования трещин и своевременно принять технологические меры для снижения или снятия данных напряжений**

Трещины во всех трех изложницах, как и ожидалось, образовались в верхней части, испытывающей максимальный разогрев в процессе заливки и охлаждения слитка, и при этом – в максимальных

ЗКН, зафиксированных в изложницах в исходном состоянии.

### Выводы

Данные результата расчета напряжений изложницы при помощи деформационного модуля СКМ ЛП "Полигон" схожи с результатами исследования напряженного состояния изложницы методом магнитной памяти металла. Из этого следует, что использование компьютерного моделирования для определения напряженного состояния отливок позволяет определить величину и зоны максимальной концентрации напряжений, возможные места образования трещин и своевременно принять технологические меры для снижения или снятия данных напряжений.

### Литература

1. Ковалевич Е.В., Баранов Б.С., Урин С.Л., Пантелеева А.В., Дубов А.А., Собранин А.А. Исследование напряжений в изложницах методом магнитной памяти // Литейщик России – № 10/2011, с. 21-24.
2. Монастырский А.В., Смыков А.Ф., Панкратов В.А., Соловьев М.Б. Прогноз образования горячих трещин и расчет коробления отливок в СКМ ЛП "ПолигонСофт" // Литейное производство – № 10/2009, CAD/CAM литейных процессов, с. 24-27.
3. Монастырский В.П., Александрович А.И., Монастырский А.В., Соловьев М.Б., Тихомиров М.Д. Моделирование напряженно-деформационного состояния отливки при кристаллизации // Литейное производство – № 8/2007, с. 45-47.
4. Монастырский А.В., Смыков А.Ф. Особенности моделирования возникновения трещин в отливках на примере СКМ ЛП "ПолигонСофт" // Литейное производство – № 12/2010, CAD/CAM литейных процессов, с. 13-15.

*Анна Пантелеева,  
инженер-конструктор  
ФГУП "НПЦ газотурбостроения  
"САЛЮТ"*

*Евгений Ковалевич,  
д.т.н., заведующий лабораторией  
ГНЦ "ЦНИИТМАШ"*

*E-mail: a.v.panteleeva@mail.ru,  
Ev-kov@yandex.ru*