



МАТЕРИАЛЫ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОГО  
СЕМИНАРА

**«Новые подходы к подготовке производства в современной литейной промышленности».**  
**17-19 мая 2005 г.**

ООО «Фокад»  
Санкт-Петербург  
2005

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Литейные материалы и технологии. Состояние и перспективы Абрамов А.А .....                                                                                                                    | 3  |
| Обзор рынка прикладных пакетов для моделирования литейных процессов. Критерии выбора моделирующей системы Тихомиров М.Д., Ермакова С.В.....                                                   | 7  |
| Новые функции для работы с конечно-элементной сеткой: функция измельчения тонких стенок и функция построения оболочки в СКМ «Полигон» Комаров И. А.....                                       | 12 |
| Критериальный анализ в САМ ЛП «Полигон» Бройтман О.А.....                                                                                                                                     | 15 |
| Моделирование процесса разлива магниевых слитков на конвейере Агалаков В.В., Кулинский А.И., Абрамов А.А., Бройтман О.А. ....                                                                 | 33 |
| Моделирование затвердевания стальных слитков различной конфигурации Хлямов Н.А., Бройтман О.А. ....                                                                                           | 42 |
| Создание оптимизационной модели техпроцесса ЛВМ с использованием СКМ «Полигон» С.В.Жеглов, А.А.Щетинин .....                                                                                  | 50 |
| Применение статистических методов анализа данных для оценки результатов процесса формирования усадочных дефектов в чугунных отливках А.В.Щетинин, А.А.Щетинин, С.В.Жеглов, В.В.Корнеева ..... | 56 |
| Новые компьютерные технологии и перспективы развития моделирующих систем (2004-2005г). Комаров И. А. ....                                                                                     | 62 |
| Современный подход к изготовлению литейной оснастки. Плаксина А.Е., Денисов Л.Ю. ....                                                                                                         | 66 |
| Проектирование литниково-питающей системы при литье по выплавляемым моделям Ребонен В.Н.....                                                                                                  | 69 |
| Опыт получения литых рабочих колес литьем по выплавляемым моделям с использованием керамических стержней. Сабилов Д.Х. Денисов Л.Ю. ....                                                      | 71 |
| Проектирование литейной технологии в САД-системах при подготовке студентов-литейщиков Ердаков И.Н.....                                                                                        | 75 |

## Литейные материалы и технологии.

### Состояние и перспективы

*д.т.н. Абрамов А.А (ФГУП «ЦНИИМ», Санкт-Петербург)*

ФГУП «ЦНИИМ» одна из колыбелей отечественной литейной науки. В течение 90-летней истории института в нем работали известные ученые-литейщики П.П. Берг, Н.Г. Гиршович, Ю.А. Нехендзи, Б.Б. Гуляев, И.А. Шапранов, Ю.Ф. Боровский, Н.Н. Белоусов, О.Н. Магницкий, Г.П. Анастасиади, В.П. Кузнецов.

В институте проводились работы по всем основным разделам литейной науки – гидродинамике, затвердеванию, усадочным процессам, кристаллизации. В настоящее время работы по развитию литейной науки и технологий продолжают специализированные предприятия АО «ЦНИИМ-Инвест» и ООО «Фокад», организованные бывшими сотрудниками «ЦНИИМа». При этом АО «ЦНИИМ-Инвест» продвигает экологически безопасные литейные технологии, такие как вакуум-плечная и низкотемпературная формовка, а ООО «Фокад» разрабатывает и внедряет компьютерные технологии в литейных производствах.

Именно на основе научных разработок, выполненных в тот период, в том числе и учеными института, и накопленных данных по теплофизическим свойствам сталей и сплавов, сосредоточенных в стандартах и технической литературе, специалистами ООО «Фокад» создана конкурентоспособная компьютерная система моделирования литейных процессов «Полигон».

В 60-е – 80-е годы прошлого столетия специалистами ЦНИИМа разработано и внедрено в различные виды спецтехники порядка 60-ти марок высокопрочных литейных сталей и сплавов, которые вошли в отраслевые, а некоторые и в государственные, стандарты (табл. 1-4).

Таблица 1

Механические свойства высокопрочных чугунов

| Класс высокопрочного чугуна | Механические свойства |                      |              |                        |                         |                                        |
|-----------------------------|-----------------------|----------------------|--------------|------------------------|-------------------------|----------------------------------------|
|                             | $\sigma_B$ , МПа      | $\sigma_{0.2}$ , МПа | $\delta$ , % | КС, КДж/м <sup>2</sup> | КСУ, КДж/м <sup>2</sup> | K <sub>1с</sub> , МПа·м <sup>1/2</sup> |
| Ферритный                   | 380-400               | 240-310              | 23-27        | 1000-1300              | 170-300                 | 70-80                                  |
| Перлитный                   | 600-700               | 420-500              | 2-5          | 200-300                | 50-60                   | 40-50                                  |
| Бейнитный                   | 1300-1400             | 1200-1250            | 6-7          | 640-990                | 100-120                 | 60-66                                  |

Таблица 2

Механические свойства высокопрочных литейных сталей

| Марка стали  | Класс стали           | Механические свойства, не менее |                      |              |                         |                                        |
|--------------|-----------------------|---------------------------------|----------------------|--------------|-------------------------|----------------------------------------|
|              |                       | $\sigma_B$ , МПа                | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | KCU, КДж/м <sup>2</sup> | K <sub>1C</sub> , МПа·м <sup>1/2</sup> |
| 38ХСЛ        | Феррито-перлитный     | 1275                            | 1079                 | 5            | 392                     | 80...90                                |
| 23ХГС2МФЛ    |                       | 1275                            | 1079                 | 6            | 392                     | 112...118                              |
| 25Х2ГНМФЛ    |                       | 1275                            | 1079                 | 6            | 392                     | 90...100                               |
| 27Х5ГСМЛ     | Бейнитный             | 1472                            | 1177                 | 5            | 392                     | 80...90                                |
| 30Х3С3ГМЛ    |                       | 1766                            | 1472                 | 4            | 196                     | 70...80                                |
| 12Х7Г3СЛ     | Мартенситный          | 1324                            | 1079                 | 9            | 40                      | 120...125                              |
| 03Н12Х5М3ТЛ  | Мартенсито-старееющий | 1324                            | 1275                 | 8            | 500                     | 120...130                              |
| 03Н12Х5М3ТЮЛ |                       | 1472                            | 1422                 | 8            | 400                     | 80...90                                |

Таблица 3

Механические свойства высокопрочных литейных алюминиевых сплавов

| Марка сплава | E, ГПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | НВ  | KCU, КДж/м <sup>2</sup> | K <sub>1C</sub> , МН/м <sup>3/2</sup> |
|--------------|--------|----------------------|------------------|--------------|-----|-------------------------|---------------------------------------|
| АЛ23-1       | 70,0   | 130                  | 250              | 10,0         | 60  | 200                     | 60                                    |
| АЛ23-3       | 77,1   | 277                  | 380              | 4,0          | 121 | 25                      | 22                                    |
| АЛ24П        | 68,9   | 372                  | 460              | 6,0          | 140 | 100                     | 24                                    |
| АЛ9М         | 71,0   | 250                  | 340              | 3,0          | 100 | 80                      | 18                                    |

Таблица 4

Механические свойства литейных титановых сплавов

| Марка сплава | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | KCU, КДж/м <sup>2</sup> |
|--------------|------------------|--------------|-------------------------|
| BT5Л         | 690              | 6,0          | 290                     |
| ТС5Л         | 880              | 5,0          | 290                     |

Особенностью приведенных в таблице 2 высокопрочных сталей является то, что для изготовления этих сталей не требуются вакуумные печи, выплавку их можно проводить в открытых индукционных печах. Это существенно упрощает весь цикл изготовления литья и расширяет перспективы внедрения сталей, в том числе, в гражданские отрасли промышленности.

Высокий уровень свойств разработанных сталей, чугунов, алюминиевых и титановых сплавов (табл. 1-4) до настоящего времени не полностью реализован даже в спецтехнике. В гражданских отраслях промышленности высокопрочные стали и сплавы, по-видимому, найдут применение еще не скоро и связано это со следующими обстоятельствами. В настоящее время в структуре себестоимости литья заработная плата составляет 15-30 %, а остальные материалы и энергия, при этом доля материалов достигает 50%. При таком соотношении цен использовать высокопрочные, естественно более дорогие стали и сплавы, явно не выгодно. В будущем при достижении оплаты труда уровня развитых стран соотношение цен естественно поменяется, доля материалов в структуре себестоимости литья уменьшится, и высокопрочные стали и сплавы будут более привлекательны.

Дальнейшие работы по увеличению прочности литейных сталей и сплавов по нашему мнению не имеют перспективы, во-первых, из-за снижения надежности при неумеренном увеличении прочности, а, во-вторых, из-за того, что особые свойства отливок (например, жаропрочность, износостойкость или твердость), как правило, необходимы только в отдельных местах отливки. Поэтому усилия исследователей должны быть направлены на создание технологий, позволяющих изготавливать композиционные отливки, а не композиционные материалы.

Таблица 5

Свойства каркасного композиционного материала карбид-алюминий

| Свойства                             | Температура, °C | АЛ25      | АК18     | TiC–<br>(Al+12%Si) |
|--------------------------------------|-----------------|-----------|----------|--------------------|
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>         | 20              | 2700      | 2680     | 3800               |
| ТКЛР, $\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ | 30...300        | 22        | 19       | 12,5               |
| E, ГПа                               | 20/400          | 82/67     | 86/71    | 183/165            |
| $\sigma_{\text{изг}}$ , МПа          | 20/400          | 430/20    | 410/70   | 420/310            |
| HB, МПа                              | 20/400          | 1000/-    | 1250/-   | 2350/110           |
| $\varepsilon$ , %                    | 20/400          | 0,57/0,03 | 0,51/0,1 | 0,23/0,19          |

В этом направлении сотрудниками института сделаны первые, но очень важные шаги, подтверждающие возможность и перспективность композиционных отливок.

Так, например, методом жидкой штамповки изготовлены композиционные отливки поршней ДВС, у которых доньшко оформлено композиционным каркасным материалом (свойства материала в табл. 5), а остальной корпус из стандартного поршневого алюминиевого сплава марки АЛ25.

Столь высокие свойства на головке поршня при температуре 400 °C, которые на обычных поршневых сплавах марок АЛ25 и АК18 получены быть не

могут, открывают широкие перспективы для совершенствования поршневых двигателей. Испытания до разрушения подтвердили высокое качество композиционных поршней.

Вторым примером может служить технология изготовления стальных отливок, работающих в условиях ударно-абразивного износа, с местным армированием крупной твердого сплава марки ВН8 (табл. 6).

Таблица 6

Результаты испытания отливок на износ в среде гранитной крошки

| Материал                         | Относительный износ образца |                |
|----------------------------------|-----------------------------|----------------|
|                                  | Через 10 часов              | Через 20 часов |
| Сталь 110Г13Л                    | 4,1                         | 7,4            |
| Сталь 40ХЛ                       | 4,3                         | 9,1            |
| Композиционный материал 40ХЛ+ВН8 | 1,2                         | 2,6            |

Кроме высокопрочных литейных сплавов специалисты института плодотворно работали в области специальных видов литья, разрабатывая как технологии, так и уникальное оборудование. Специалисты института внесли весомый вклад в развитие ряда технологических процессов, таких как литье по выплавляемым моделям, центробежное литье, автоклавное литье, литье методом направленного заполнения формы, литье под низким давлением, литье под давлением в вакуумированную пресс-форму. Отдельные из этих процессов и оборудование для их реализации были разработаны для изготовления конкретной и очень небольшой номенклатуры отливок. При переходе на новые изделия и новые технические решения такие сложные и дорогие процессы как центробежное литье, автоклавное литье, литье методом направленного заполнения формы, литье под давлением в вакуумированную пресс-форму предприятиями не используются. Будут ли в будущем востребованы эти технологии, и когда это может произойти предположить сложно.

Что касается литейных технологий, то, очевидно, что в ближайшие десятилетия они будут развиваться в двух основных направлениях.

Первое из них – это широкое внедрение компьютерных технологий, под которыми понимаются компьютерный анализ (компьютерное моделирование), компьютерный синтез технологии и использование САД-систем при проектировании технологии и оснастки с изготовлением ее на станках с ЧПУ.

Второе направление связано с тем, что резко повысятся требования к экологической безопасности процессов литья, поэтому такие технологии как вакуум-пленочная и низкотемпературная формовки, где нет химических связующих, все виды литья в металлические формы будут активно развиваться и совершенствоваться. Особенно это актуально для многономенклатурных мелкосерийных производств, которых в настоящее время становится все больше.

## Обзор рынка прикладных пакетов для моделирования литейных процессов. Критерии выбора моделирующей системы

к.т.н. Тихомиров М.Д., к.т.н. Ермакова С.В. (ООО «Фокад», Санкт-Петербург)

В последние полтора-два года на литейных производствах России наблюдается резкое увеличение спроса на системы моделирования. При этом у пользователей нет ясного представления о том, что должна и может делать моделирующая система, а что должны делать другие подсистемы САПР.

Иногда к моделирующим системам предъявляют различные требования, для обеспечения которых они совершенно не предназначены. В связи с этим возникает необходимость четко определить место моделирования в программном обеспечении, входящем в САПР ЛТ.

В рамках САПР можно выделить два совершенно различных вида систем: системы **синтеза** технологии и системы **анализа** технологии [1]. Системы синтеза и анализа принципиально различаются по: внутреннему устройству, назначению, возможностям, принципам применения, техническим и организационным решениям при их внедрении. Более того, для их успешной эксплуатации чаще всего требуются пользователи с разной специализацией и квалификацией. В принципе эти системы могут успешно функционировать независимо. В идеальном случае системы синтеза и анализа могут применяться совместно [4], используя результаты работы друг друга.

**Системы СИНТЕЗА технологии.** К системам синтеза обычно относят два вида программного обеспечения:

во-первых, это графические системы для создания геометрических моделей или чертежей – так называемые **CAD-системы**. Это чаще всего универсальные конструкторские пакеты не являющиеся специфическими литейными системами.

во-вторых, **программное обеспечение для генерации технологических параметров**, которое должно быть узкоспециализированным и отражать специфику конкретного предприятия.

Для отработанных технологий типовых отливок такие системы позволяют получить на выходе большинство необходимых параметров. Системы синтеза литейной технологии могут с успехом применяться для производств с ограниченной номенклатурой. Использование таких систем не требует от пользователя особой подготовки и большого опыта.

**Главное назначение систем синтеза** - автоматизировать рутинные операции проектирования, существенно снизить процент ошибок при их проведении, высвободить время технолога для решения действительно творческих задач, которые трудно или невозможно автоматизировать.

Системы синтеза могут существенно облегчить труд технолога, но не могут за технолога решить вопросы проектирования «не типовых» литейных технологий. Кроме того, успешную адаптации системы (или точнее создание) на конкретном заводе могут провести только заводские специалисты различного профиля. К сожалению, в условиях реального производства организовать такую работу достаточно трудно.

В настоящее время внедрение полномасштабной системы синтеза ЛТ требует от заводов таких усилий, что это становится невозможным. Именно по этой причине примеров успешного разворачивания системы синтеза литейной технологии в России практически нет.

**Системы АНАЛИЗА литейной технологии.** К системам анализа литейной технологии относится программное обеспечение для численного моделирования физических процессов происходящих в отливках. В таких программах на компьютере «проигрываются» различные процессы при формировании отливки (тепловые, гидродинамические, усадочные, деформационные и т.д.), на основе которых моделируются процессы образования различных дефектов, прогнозируются различные свойства, эксплуатационные характеристики и т.п.

В структуре интегрированной системы автоматизированного проектирования литейных технологий (САПР ЛТ) [1-2] моделирующие системы являются одной из подсистем САПР ЛТ и предназначены для : отработки сложных или ответственных технологий (как серийных так и разовых); определения параметров наиболее важных по влиянию на качество; нахождения причин брака в уже применяемых неудачных технологиях; определения устойчивости технологии к изменению внешних параметров; а также для поиска таких технологических решений, которые требуют понимания происходящих в отливке процессов.

Использование моделирующих систем – это не упрощение процесса проектирования, а способ сделать его более интеллектуально емким, более осмысленным, более надежным, более эффективным.

Успешное использование таких систем требует от пользователя достаточной профессиональной подготовки и творческого подхода к процессу проектирования. Несмотря на повышенные требования, предъявляемые к пользователю, литейные моделирующие системы сейчас активно применяются на десятках заводах России.

Главное отличие систем анализа от систем синтеза состоит в том, что ***моделирующие системы на выходе не выдают никаких технологических рекомендаций.*** Моделирование должно показать к чему приведет использование заданных технологических параметров.

Важной особенностью моделирующих систем является то, что все параметры моделируемой технологии пользователь-технолог в качестве входных данных должен определить сам. Моделируя разные варианты технологии, можно подобрать такие технологические параметры, которые обеспечат устойчивую, бездефектную и экономически выгодную (оптимальную) технологию.

Моделирующие системы дают возможность минимизировать затраты на стадии подготовки производства и освоения новой номенклатуры отливок за счет перебора возможных технологических решений на компьютере. Возможности моделирующих систем этим не ограничиваются.

Основное преимущество таких систем и **главное их назначение в том, что** моделирующая система:

- позволяет технологу пронаблюдать процессы идущие в отливке, и понять по каким причинам образовывается тот или иной дефект в конкретной от-

ливке при данных конкретных технологических параметрах, т.е. «увидеть» то, что в реальности он увидеть не может.

- помогает технологу целенаправленно искать именно тот вариант технологии, который обеспечит требуемое качество отливки.

- использование технологом-литейщиком моделирующей системы существенно повышает его квалификацию, причем в достаточно короткое время.

Те представления о ходе реальных процессов, которые раньше технологи набавывали десятилетиями, с помощью моделирования можно получить за год, причем безболезненно для производства.

**Численные алгоритмы.** Моделирующие системы используют для решения основных задач затвердевания и образования усадочных дефектов численные методы: конечных элементов (МКЭ) и конечных разностей (МКР).

Метод конечных элементов молодой, математизированный и содержит меньше упрощений, что позволяет получать более адекватные результаты расчетов. Для внешнего наблюдателя эти методы отличаются по представлению геометрии – при разностном методе геометрия представлена «кирпичиками» (параллелепипедами), а при элементном методе используется достаточно гладкая сетка конечных элементов (чаще всего тетраэдров).

МКР требует больших затрат времени и вычислительных ресурсов по сравнению с МКЭ, если добиваться равной адекватности. МКЭ более современный, прогрессивный и больше подходит для решения *основных литейных задач*.

Для условий литья разностные методы могут адекватно использоваться при литье в малотеплопроводные разовые формы. При литье в кокиль, ЛПД, ЛНД и т.п. (особенно при сложных фасонных геометриях) разностные методы всегда будут давать принципиальную систематическую погрешность, которая отсутствует в конечно-элементных методах

**Критериальные алгоритмы.** Совместно с численными решениями, в литейных моделирующих системах часто применяется *критериальный анализ*.

В современных пакетах чаще всего такие сложнейшие задачи как прогноз структуры, механических свойств и т.д. решается именно на уровне использования подобных критериев. Наиболее известным является критерий Наямы, с помощью которого на базе температурных полей можно получить распределение микропористости в объеме отливки.

Критериальный анализ при правильном использовании может быть очень мощным инструментом в руках технолога. Например, в пакете «Полигон» для критериального анализа разработан отдельный модуль. Адаптация критерия к конкретному литейному производству позволяет получить адекватный прогноз.

**В Европе, Англии и США** в настоящее время наиболее распространены **ProCast** и **MagmaSoft**. MagmaSoft больше распространена в Европе, но для наиболее ответственных литейных технологий (литье лопаток для турбин самолетов и др. отливок ответственного назначения) все же применяют ProCast.

Определенный сегмент рынка в Европе занимают системы WinCast (Simtec) и NovaFlow.

Численные решения в **WinCast** проводятся на базе современного и гораздо более адекватного метода конечных элементов.

Несмотря на то, что в пакете **WinCast** используются определенные упрощения при решении основных литейных задач - тепловой (затвердевание) и усадочно-фильтрационной (образование микропористости, макропористости и раковин).

Тем не менее, в **WinCast** на высоком уровне моделируются деформационные процессы в процессе охлаждения отливки, что для ряда литейных производств может быть весьма привлекательным.

Система **NovaFlow** на западе распространяется шведской фирмой **NovaCast**, на отечественном рынке эта система имеет название **LVMFlow**. В настоящее время в России эта система занимает второе место по распространенности после Полигона. Численные решения выполняются на базе метода конечных разностей. Несмотря на все недостатки конечных разностей, **LVMFlow** может вполне адекватно применяться для моделирования литья в малотеплопроводные разовые формы. По таким показателям, как скорость расчетов, удобство интерфейса и некоторым другим важным параметрам, **LVMFlow** вполне может составлять конкуренцию любым разностным западным пакетам.

**MagmaSoft - (Германия)** немецкий моделирующий пакет, базирующийся на методе конечных разностей, один из первых коммерческих литейных пакетов.

Численными методами в **MagmaSoft** решаются тепловые, гидродинамические и деформационные процессы. Также численно решается задача прогноза макропористости и раковин, хотя используемые при этом модели имеют упрощенный характер, не отражающий современные представления о процессах протекающих в сплавах в интервале затвердевания.

Прогноз микропористости, структурных, механических характеристик отливки проводится на уровне критериального анализа. **MagmaSoft** имеет собственный хорошо развитый генератор разностных сеток.

К наиболее сильным сторонам **MagmaSoft** можно отнести большое количество критериев, которые на уровне критериального анализа позволяют прогнозировать различные полезные свойства - структуру, механические характеристики и т.д.

К недостаткам этой системы относятся "закрытый" характер используемых критериев и невозможность их редактировать, что существенно снижает возможность их адекватного применения.

В настоящее время **MagmaSoft** является одним из самых дорогих литейных пакетов. С учетом соотношения «цена/возможности» в качестве литейного пакета «среднего» уровня более выигрышно выглядит, например, **LVMFlow**.

**ProCast** – американский конечно-элементный пакет. В **ProCast** численными методами моделируются тепловые, гидродинамические и деформационные процессы, а также процессы структурообразования (кристаллизационные процессы). Критериальный анализ в **ProCast** представлен достаточно слабо.

К главным достоинствам этого пакета следует отнести: возможность учета сложных тепловых граничных условий; моделирование перемещения объек-

тов (например, для направленного затвердевания лопаток); учет сложной реологии при деформационных расчетах, что позволяет моделировать такие сложные процессы, как непластические течения; численный расчет структуры в отливках. ProCast имеет собственный генератор конечно-элементных сеток, которым можно с успехом пользоваться для геометрий средней сложности. К недостаткам этого пакета можно отнести слабый уровень решения усадочной задачи и устаревший интерфейс при вводе данных и визуализации расчетов. Наиболее эффективно использование этого пакета в случаях, когда технологом требуется решение деформационных задач и задач формирования структуры в отливке.

В России больше используются российские разработки Полигон и LVMFlow. Литейная система моделирования «Полигон» наиболее покупаемая и применяемая в России. Количество приобретенных новых лицензий за прошлый год выросло в два – два с половиной. В общей сложности заводы и ВУЗы СНГ приобрели только за один прошлый год более полутора десятков постоянных и временных лицензий СКМ ЛП «Полигон».

Конечно-элементные пакеты (Полигон, ProCast) по сравнению с конечно-разностными пакетами объективно имеют более широкий круг применимости для сложных геометрии отливок и для различных способов литья.

Подводя итог выше изложенному можно определить критерии выбора моделирующей литейной программы:

1. Физические модели, используемые моделирующей системой, должны быть открыты для пользователя. Любая самая сложная литейная моделирующая программа всегда содержит определенные упрощения. Чем лучше пользователь представляет себе модели, заложенные в используемую им систему моделирования, тем более надежные технологические решения он сможет принимать с помощью моделирования.

2. Знание наиболее важных особенностей программной реализации СКМ ЛП. Использование системой наиболее прогрессивных и адекватных численных алгоритмов.

3. Наличие профессионального сопровождения разработчиков в период освоения. Поскольку моделирующие системы являются сложным и интеллектуально-емким профессиональным программным продуктом, то их освоение может быть не таким уж простым.

4. Необходимо учитывать опыт применения пакета в России

5. Для осознанного выбора СКМ ЛП заводские специалисты должны сами ознакомиться с системами, выяснить какие модели и алгоритмы системы используют, понять насколько это может быть применимо к тем задачам, которые стоят перед заводом.

**Новые функции для работы с конечно-элементной сеткой:  
функция измельчения тонких стенок и функция построения оболочки в  
СКМ «Полигон»**

*Комаров И. А. (ООО «Фокад», Санкт-Петербург)*

Одна из ключевых особенностей конечно-элементного (КЭ) метода заключается в том, что рассчитываемая величина имеет в пределах одного элемента некоторое функциональное распределение. В случае так называемых симплекс-элементов, четырех-узловых тетраэдров, мы имеем дело с линейным распределением. Благодаря этому мы можем выяснять интересующие нас значения расчетной величины в произвольных точках объекта. Например, в «тонких» стенках, толщиной в один элемент, мы можем наблюдать линейное распределение температуры от одной стенки к другой.

Однако следует помнить о том, что при расчете КЭ методом фактически вычисляются значения в узлах КЭ сетки. Поэтому в тонких, не содержащих внутри себя узлов, стенках, невозможно получить локальный минимум/максимум расчетной функции и, соответственно, выявить тепловой узел или предсказать пористость. Чтобы решение данных задач было возможным, необходимо обеспечить наличие внутри стенки хотя бы одного узла. Общие рекомендации, которых стоит придерживаться при построении КЭ сетки следующие: все стенки, участки, должны быть разбиты на элементы такого размера, чтобы по их толщине укладывалось 2-5 элементов. Понятно, что в случае существенно разностенных деталей, для этого необходимо задавать разные размеры КЭ сетки для разных участков.

К сожалению, в большинстве распространенных на рынке генераторах КЭ сетки отсутствуют какие-либо средства, которые бы могли помочь выполнить данное требование. Безусловно, задача решается тщательным ручным контролем за размерами элементов в разных частях объекта, однако это весьма трудоемкая деятельность. Очень часто конструктор или технолог, моделирующий какую-либо физическую задачу, предпочитает задать одинаковый размер элементов для всего моделируемого объекта. В результате в КЭ сетке может присутствовать значительное число участков с толщиной стенки один элемент, либо общее число элементов становится чрезмерно большим и размерность решаемой задачи становится неадекватной ее смысловой сложности.

Разработчики СКМ ЛП «Полигон» сами регулярно выполняют моделирование и сталкиваются с этими проблемами. Чтобы хотя бы частично решить их, в модуль препроцессора «Полигона» была введена новая функция – поиск и измельчение элементов в тонких стенках. Этот инструмент позволяет *полностью автоматически* выявлять стенки толщиной в один или несколько элементов и затем – измельчать их, обеспечивая нужный размер элементов внутри всего объема моделируемого объекта. В качестве иллюстрации работы данного инструмента приводятся два рисунка; на одном из них изображена КЭ сетка до обработки (рис. 1) и на ней видны участки с толщиной стенок один элемент, а на другом – после обработки (рис 2).

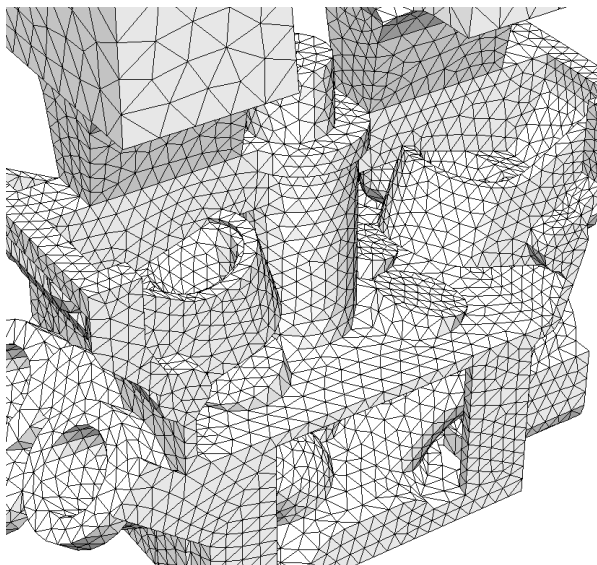


рис. 1

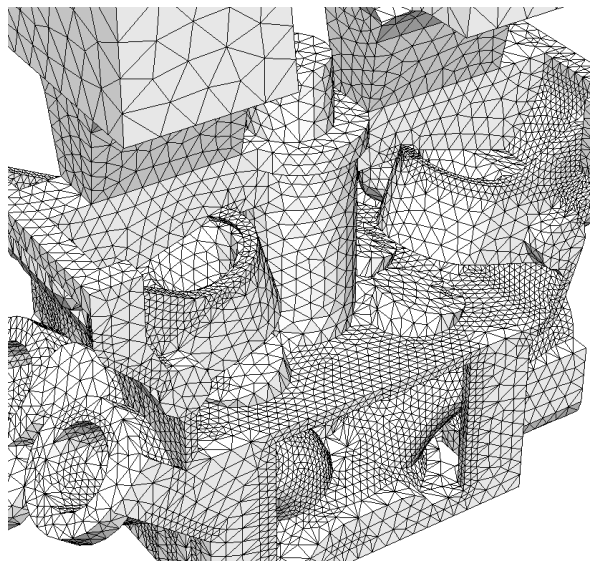


рис. 2

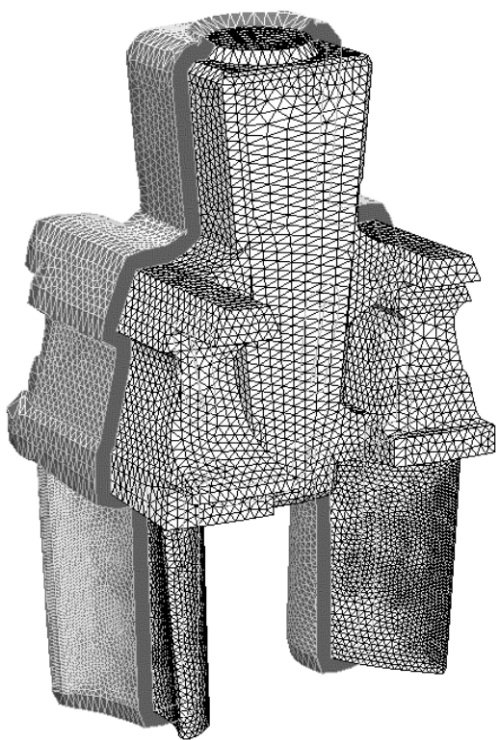


рис. 3

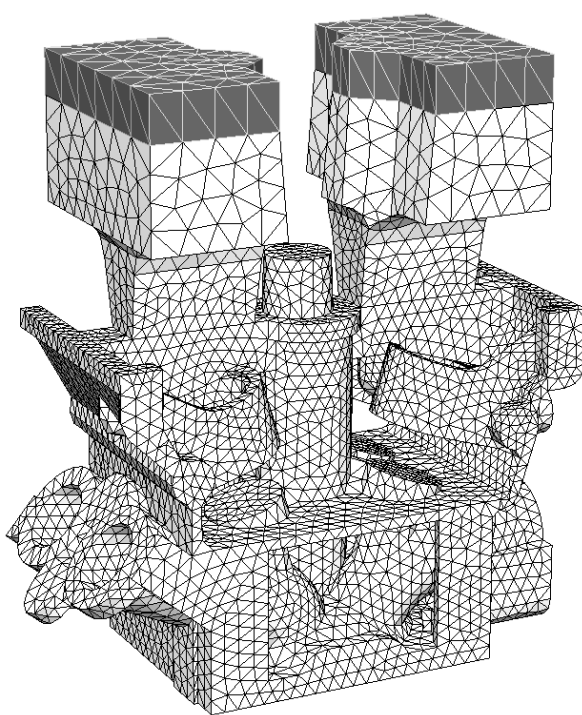


рис. 4

Зачастую построение КЭ сетки формы – значительно более трудоемкая задача, чем построение КЭ сетки отливки. Это объясняется тем, что во многих случаях форма представляет собой сравнительно тонкую оболочку вокруг отливки сложной формы и при подготовке КЭ сетки приходится работать не с одним набором сложных поверхностей (граница раздела отливка-форма), а с двумя (границы раздела отливка-форма и форма-среда). В то же время, весьма желательно производить расчет полной модели, отливка-форма, не ограничиваясь

расчетом охлаждения отливки в виртуальную среду. Несмотря на тщательную проработку методики расчета для данного варианта, учесть геометрию формы в этом случае, естественно, невозможно. В подобных случаях иногда возможно упростить генерацию КЭ сетки для формы, создав ее в виде оболочки, эквидистантной поверхности отливки.

Для таких случаев в модуле препроцессора «Полигона» разработана специальная функция – генерация оболочечной сетки. Она позволяет построить КЭ сетку заданной толщины на основе выделенных поверхностных фасеток, как бы «вытягивая» их на указанное расстояние (рис 3). Следует заметить, что данную функцию вовсе необязательно использовать именно для генерации каких-либо оболочек. Вполне возможно с ее помощью вносить также другие изменения в геометрическую модель – скажем, утеплить или увеличить прибыль (рис 4).

## Критериальный анализ в САМ ЛП «Полигон»

Бройтман О.А. (ООО «Фокад», Санкт-Петербург)

Модуль критериального анализа «Критерий-3D» не так давно был введён в трёхмерную ветку системы «Полигон». С момента появления до сегодняшнего дня модуль претерпел ряд усовершенствований и изменений, которые были следствием стремления универсализовать модуль, предоставить пользователю решать с помощью «Критерия» максимально большее количество задач в достаточно сложной постановке. Что это за задачи? Практически всё то, что нельзя или пока нельзя посчитать в базовой части «Полигона» численно.

При отработке технологии получения отливки перед пользователем моделирующей системы встаёт ряд задач, для которых нет необходимости или возможности, ввиду значительной сложности протекающих процессов, применить численное решение. Зато в результате моделирования практически в любом расчётном литейном пакете у пользователя есть главное – расчётные поля температур в отливке и форме в любой момент времени в течение процесса затвердевания. Естественно, наличие такой информации само по себе уже ценно – можно наблюдать появление тепловых узлов, эффективность работы по отводу тепла либо, наоборот, утеплению тех или иных частей литейной формы. Можно отметить, что технолог-литейщик обладает знанием некоторых критериев, по которым он определит по результатам просмотра полей температур места, в которых могут появиться усадочные дефекты. В случае применения «Полигона» давать таким образом ответ на вопрос о появлении дефектов, конечно, не нужно, поскольку программа произведёт численный расчёт зон возникновения макро- и микропористости с помощью заложенных в неё сложных математических моделей. Но если представить, что всех этих сложных моделей нет, а оценку пористости произвести всё-таки нужно, и есть возможность производить вычисления над имеющимися значениями температур, то, очевидно, пришлось бы воспользоваться какими-то упрощёнными моделями, формулами, отражающими общие наблюдения за особенностями процесса возникновения усадки. Примером такого анализа является использование известного *критерия* Ниямы, с помощью которого может производиться *критеральная* обработка полей температур, формулируемого в виде:

$$Ni = \frac{G}{\sqrt{V_{охл}}}, \quad (1)$$

где  $G$  – температурный градиент,  $V_{охл}$  – скорость охлаждения. В отсутствие сложных моделей процесса формирования усадки формула (1) используется некоторыми программами анализа литейной технологии для предсказания усадочных дефектов.

Во многих случаях особенности протекания того или иного процесса не очевидны, строгие детерминированные модели включают массу констант и коэффициентов, которые сложно определить экспериментально, тем более для всех применяемых литейных сплавов и материалов. В этом случае рациональным подходом является применение статистических моделей. Поскольку для большинства процессов, протекающих при формировании качества отливки,

ведущим фактором является теплоотвод, то могут быть применены статистические модели, входными параметрами которых будут некоторые характеристики процесса теплоотвода (скорость охлаждения, температурные градиенты и др.). Примером реализации такого подхода является применение критериев по прогнозу прочности, твёрдости, структуры, опирающиеся на эмпирические формулы, в которых входным параметром является скорость охлаждения (рис. 1).

Итак, можно сформулировать предназначение модуля «Критерий-3D» следующим образом: модуль предназначен для анализа расчётных полей, полученных при моделировании литейной технологии в «Полигоне». По завершении расчётов в «Полигоне» пользователь располагает следующими данными: изменение во времени полей температур в отливке и форме при заливке и затвердевании, изменение полей скоростей в жидком металле при заливке, поля жидкой фазы в процессе затвердевания, поля давлений и пористости в отливке в процессе затвердевания. Это достаточно большой объём информации для того, чтобы пользоваться этими данными с выходом на различные параметры качества отливки и диагностировать литейную технологию. Весь вопрос только в том, чтобы был набор надёжных формул (аналитических, эмпирических, полуэмпирических), которые с известной долей упрощения позволят связывать имеющиеся расчётные поля с интересующим технолога параметром качества. Такое математическое описание связи и есть критерий для обработки расчётных полей.

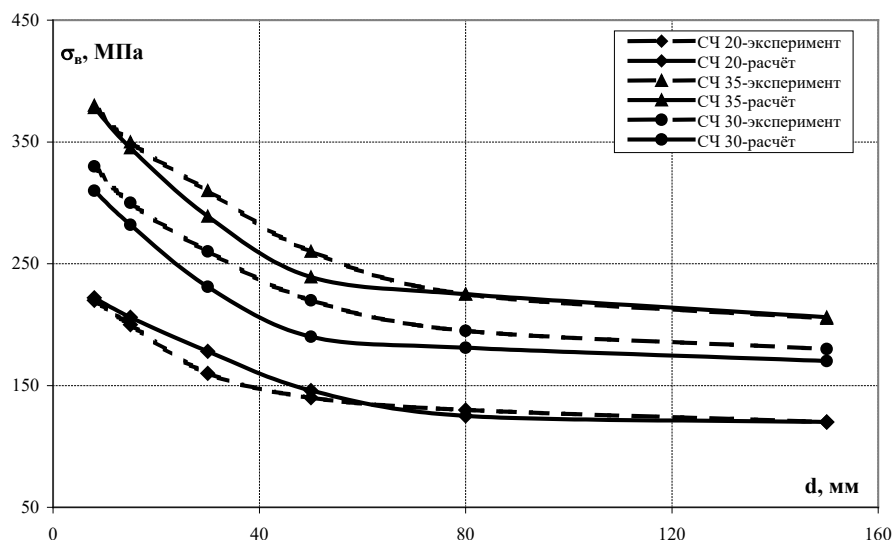


Рис. 1. Прогноз прочности в стандартных образцах различного диаметра  $d$ , залитых в песчано-глинистую форму: сравнение расчётных (по критерию «Прочность СЧ») и экспериментальных данных

Однако, использовать как-то напрямую имеющиеся расчётные поля нет возможности, ведь в формулах критерия фигурируют такие параметры как скорость охлаждения, время затвердевания, температурные градиенты и др. Поэтому необходимо, чтобы в программу, осуществляющую критериальный анализ, были заложены алгоритмы вычислений этих необходимых операционных параметров. Исходя из означенного требования в модуле «Критерий-3D» предусмотрена возможность произведения вычислений и операций со следую-

щим стандартным набором критериальных переменных и функций: температуры ликвидус и солидус, перегрев, время затвердевания, скорость продвижения изоповерхности заданного пользователем значения, градиенты температурные и поля жидкой фазы, скорость изменения рассчитанной величины при достижении ею определённого значения, времена, в течение которых величина была выше или ниже определённого значения, возможность выявления максимальных и минимальных значений рассчитанной величины в локальной области и некоторые другие (рис. 2а).

Поскольку критерий может базироваться далеко не на одной, а на некотором наборе формул, предусмотрена вкладка «Переменные» окна модуля «Критерий-3D», на которой пользователь может объявлять собственные переменные (рис. 2б), «сконструированные» из критериальных и стандартных математических функций, и использовать их в формулах критерия. Логика переходов от расчёта по одной либо другой формуле (если это необходимо) может быть описана на вкладке «Составные переменные» (рис. 2в).

Разработчиками «Полигона» ведётся создание библиотеки критериев, поставляемых вместе с системой. Эта библиотека должна пополняться и пользователем путём составления собственных критериев. Библиотечные критерии могут беспрепятственно корректироваться. Совместно с загружаемыми в модуль «Критерий-3D» файлами, хранящими формулы библиотечных критериев, поставляется описание критериев и методики их применения. На настоящий момент времени в библиотеку входят критерии для прогноза прочности СЧ, твёрдости СЧ, размыва, металлизированного пригара. Подготовлены также критерии для прогноза структуры и свойств отливок, изготовленных из некоторых широко применяемых алюминиевых сплавов.

В основе критериев «Прочность СЧ» и «Твёрдость СЧ», а также прогнозирующих структуру и свойства отливок из алюминиевых сплавов (см., например [1]) лежат эмпирические зависимости, устанавливающие связь искомой характеристики со скоростью охлаждения (рис. 3).

Полуэмпирические формулы критерия «Размыв» устанавливают связь между скоростью металла у поверхности раздела отливка-форма при заполнении полости формы и усилием, действующим на песчинку на этой границе раздела. На основании сравнения полученного усилия с прочностью смеси делается вывод о вероятности размыва (рис. 4).

Критерий «Металлизированный пригар» основан на аналитических формулах. Анализ механизма возникновения металлизированного пригара [2, 3] позволяет выдвинуть три условия, при одновременном выполнении которых возможно возникновение этого дефекта литья: превышение капиллярного противодавления со стороны формы (1) при условии длительного существования жидкого металла у границы раздела металл-форма (2) и, одновременно, прогрева формы на некоторую глубину до температуры, при которой металл способен течь (3). Сформулированное правило требует критериальной обработки расчётных полей давлений в металле (расчёт давлений и запись в соответствующий файл производится «Полигоном» в рамках расчёта микропористости), полей

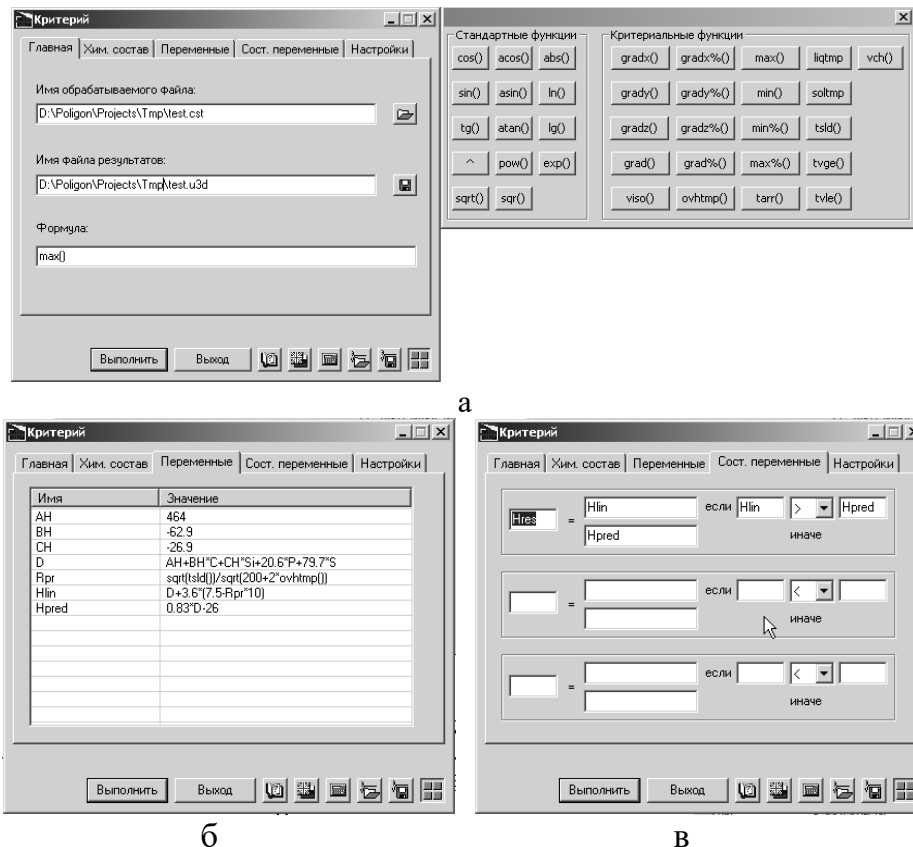


Рис. 2. Окно критериального модуля и его вкладки  
 а – вкладка «Главная» и дополнительная панель с переменными и функциями;  
 б – вкладка «Переменные»;  
 в – вкладка «Составные переменные»

жидкой фазы в металле и температур в форме, что и производится посредством составленного критерия (рис. 5).

Следует отметить, что при составлении мало-мальски сложного критерия используются некоторые коэффициенты эмпирических формул, некоторые экспериментально определённые константы процесса. На стадии адаптации того или иного критерия разумно корректировать эти коэффициенты, добиваясь, чтобы результат критериального анализа максимально приближался к реальности. Такой подход совершенно обоснован. Во-первых, используемые для составления критерия модели зачастую просты, значит, корректируя коэффициенты, мы подспудно учитываем то, что никак не описано математически в структуре критерия. Во-вторых, экспериментальное определение не всегда даёт точные значения, иногда условия эксперимента таковы, что отличаются от реального процесса литья, не говоря уже о том, что в условиях литейного производства достаточно сложно учесть все случайные факторы, которые могут повлиять на качество отливки при заливке в литейном цеху. Поэтому адаптация критерия к конкретному литейному производству – это необходимое условие точного критериального прогноза на основе моделирования базовых литейных процессов.

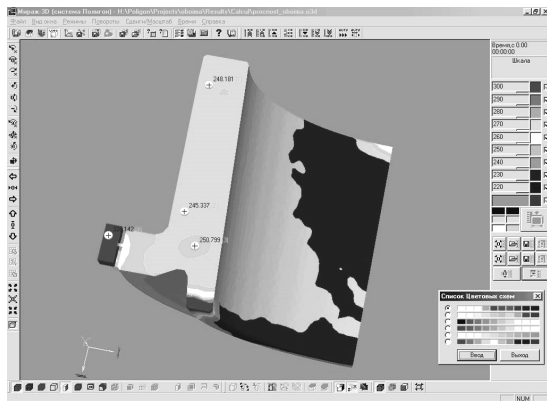


Рис. 3. Поля прочности (МПа) в теле отливки из чугуна

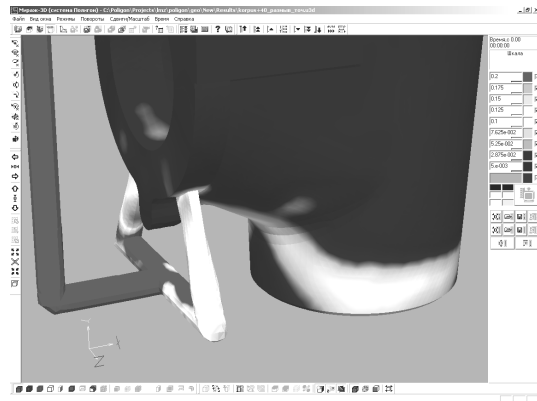


Рис. 4. Прогноз склонности к размы-  
ву литейной формы

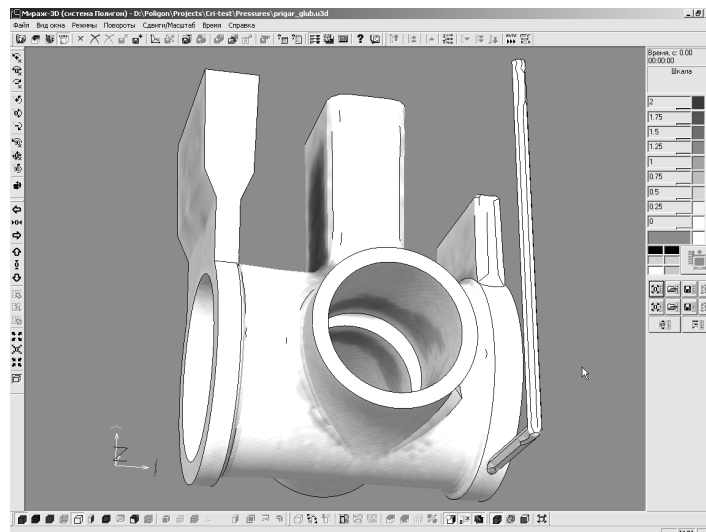


Рис. 5. Места на поверхности отливки, в которых вероятно появление металлизированного пригара (с указанием глубины, мм)

Необходимо отметить тот факт, что в современных СКМ ЛП зачастую задачи о прогнозе структуры, механических свойств и др. решается именно на уровне использования некоторых относительно несложных критериев. Крайне важно, чтобы у пользователя была полная информация о применяемом в том или другом случае критерии и возможность изменять этот критерий, редактировать коэффициенты, встречающиеся в формулах критерия. Если нет такой возможности, то вставленный в СКМ критерий будет правильно работать только в тех конкретных и достаточно узких условиях, для которых разработчики определили эмпирические коэффициенты.

Резюмируя настоящий доклад, следует отметить следующее. Как было показано, критерии, входящие в состав библиотеки критериев «Полигона» полностью открыты для редактирования, описания включают методику адаптации к условиям конкретного производства; пользователь может составлять самостоятельно любые критерии, соединяя в математическую запись имеющиеся в критериальном модуле стандартные переменные и функции. Пользователь практически получает возможность решать такие задачи, о которых разработчики и не заявляли. В «Полигоне» возможна критериальная обработка всех расчётных полей, получаемых при численном моделировании базовых процес-

сов. Эти критерии могут содержать сложные формулы, логику, включать в себя химический состав.

Кроме того, все это дополнено функциями по привязке к формируемым критериям набора любых пользовательских слайдов (для этого предназначен модуль «Слайд»), которые могут содержать, например, фотографии структур. При наличии такого набора слайдов, просматривая поля, полученные в результате критериального анализа, можно не только увидеть распределение некоторого параметра согласно выбранной цветовой палитре, но и вывести в любых указанных точках фотографии структуры, которая соответствует интервальным значениям критерия в этих точках. Работа над созданием баз слайдов ведётся разработчиками в настоящее время.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Эллиот Р. Управление эвтектическим затвердеванием. – М.: Металлургия, 1987. – 352 с.
2. Голод В.М., Корнюшкин О.А. Теория литейной формы. Механика и теплофизика. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 108 с.
3. Валисовский И.В. Пригар на отливках. М.: Машиностроение, 1983. – 192 с.

**Расчет макро- и микропористости в САМ ЛП «Полигон»**  
*Петрунина С.В., Монастырский В.П. (ФГУП МПП «Салют»)*

В современном литейном производстве, где разнообразие и сложность вопросов, связанных с проектированием и производством качественных отливок заданной точности очень велики, становится все более актуальным применение систем автоматизации процесса проектирования и моделирования литейных процессов. Это обеспечивает разработку оптимальной и наиболее экономической технологии изготовления отливок.

В настоящее время на ММПП «Салют» проектирование деталей ведется с применением системы автоматизированного моделирования литейных процессов (САМ ЛП) «Полигон», предназначенной для решения задач литейного производства. САМ ЛП «Полигон» позволяет снизить затраты на проектирование и доводку литейной технологии за счет отработки конструкций литниковопитающей системы (ЛПС) и температурно-временных характеристик технологического процесса не на реальной отливке, а на ее компьютерной модели.

*1. Построение сложных конечно-элементных моделей*

Подготовка исходных данных для расчета чаще всего самый трудоемкий процесс. Прежде всего, это касается построения конечно-элементных (КЭ) моделей. Комбинированное использование нескольких генераторов сеток различного уровня позволяет относительно быстро получать КЭ модели отливок практически любой сложности.

Более серьезная проблема – построение КЭ моделей различных тел, обозначенных в системе «Полигон» понятием форма. Это может быть, например, керамическая форма, различные стержни, опока с наполнителем, различные теплоизолирующие материалы. Само моделирование в САД-системе таких тел *является сложной конструкторской работой* (часто сопровождается серьезными трудностями). В литейном производстве на ММПП «Салют», например, распространена следующая система тел: отливка, внутри которой находится стержень, снаружи керамическая форма, оболочка покрыта теплоизолирующим материалом (возможно частично). При этом стержень контактирует с отливкой и формой, форма контактирует с отливкой и теплоизоляцией, отливка может контактировать со всеми материалами. Требуется получить КЭ модель, состоящую как минимум из четырех сопряженных между собой сеток. Если же, отливка имеет сложную геометрию и резкие переходы от толстого к тонкому сечению, то сеток будет еще больше.

За три года эксплуатации «Полигона» такая задача решалась нами при использовании универсальных генераторов сеток (Unigraphics и Altair HyperMesh) не более двух-трех раз. Трудоемкость построения такой модели заставляет пользоваться в расчетах моделью виртуальной формы, что далеко не всегда дает ожидаемый результат.

Новые возможности области построения КЭ моделей открывает генератор сеток MeshCAST, поставляемый как модуль популярной на западе системы ProCAST. Это специализированный генератор КЭ сеток имеющий специальные

встроенные алгоритмы для построения многослойных оболочек. В качестве исходных данных требуется геометрическая или же любая сеточная (2 или 3d) модель отливки.

В модуле MeshCAST можно построить в автоматическом режиме нужное количество оболочек любой толщины и при этом все сетки будут сопрягаться. Например, нам надо получить геометрическую модель детали с формой и теплоизоляцией, которая утепляет прибыль. Для этого строим первый слой оболочки толщиной 8мм. После этого строим второй слой оболочки, в данном случае толщиной 24мм. Далее создаем 3D конечно-элементную сетку модели и импортируем файл в модуль САМ ЛП «Полигон» «Мастер-3D». В модуле «Мастер-3D» с помощью имеющихся средств удаляем ненужные элементы в сетке изоляции. В итоге получаем нужную нам геометрическую модель детали с формой и теплоизоляцией.

## *2. Многоступенчатый расчет в системе САМ ЛП «Полигон»*

Построение сложных конечно-элементных моделей дает возможность проводить многоступенчатые расчеты, максимально приближающие вычислительный эксперимент к технологическому процессу. Практика показывает, что такие расчеты особенно важны при доработке ЛПС деталей, находящихся в серийном производстве. Зачастую, только тщательное моделирование всех условий технологического процесса (таких как: охлаждение формы перед заливкой, влияние муфеля печи, снятие и «укутывание» блока теплоизоляцией в процессе затвердевания) позволяет получить «на экране» картину близкую к реальности. И устранять брак в серийных деталях часто приходится именно варьированием этих условий без изменения ЛПС. В качестве примера можно привести моделирование с целью оптимизации технологического процесса рабочей лопатки 3 ступени силовой турбины наземной установки МЭС-60. Моделируемый цикл состоит из 3-х этапов:

- Нагретую до 1050 °С форму вынимают из прокалочной печи и ставят в муфель плавильной установки УВПП. Муфель имеет неоднородное по высоте температурное поле (при заданной температуре на контрольной термопаре 950 °С). Часть формы (заливочная чаша и прибыль на замке) выступает за пределы муфеля и фактически остывает на воздухе.
- Муфель с формой подается в вакуумную камеру, форма заливается расплавом, нагретым до 1500 °С.
- Блок вынимают из муфеля и помещают в термостат до полного затвердевания. Температура в термостате – 850 °С.

Весь этот сложный процесс можно воспроизвести в системе «Полигон». Для этого понадобится провести три расчета:

**Расчет 1.** Моделируется остывание пустой формы с момента извлечения её из прокалочной печи до заливки металлом. Продолжительность расчета по результатам хронометрирования в цехе 265 секунд. Переменное во времени температурное поле задается в файле динамической среды. Это позволяет моделировать сначала температуру окружающей среды при переносе формы из печи в

муфель, затем температурное поле муфеля и среды над ним. Отсутствие в форме металла моделируем, задавая объему, помеченному как отливка, тепловые свойства близкие к свойствам воздуха.

**Расчет 2.** Моделируется остывание литейного блока с момента заполнения формы расплавом до момента извлечения блока из муфеля. Объему, помеченному как отливка, задаются тепловые свойства сплава. Для формы в качестве исходного поля температур задаются температуры последнего шага предыдущего расчета. Продолжительность расчета 470 секунд. Ведется расчет макро- и микропористости в отливке. Также как и в первом расчете используется динамическая среда для моделирования температурного поля вокруг блока.

**Расчет 3.** Моделируется остывание литейного блока до температуры солидус в термостате. В качестве исходных температурных полей задаются температуры в узлах отливки и формы, полученные на последнем шаге предыдущего расчета. Также задается начальное количество жидкой фазы и гидростатическое давление в узлах отливки.

В приведенном примере расчет показал недостаточное утепление прибыли и чаши блока. Поэтому было принято следующее решение: после извлечения блока из муфеля накрыть чашу и прибыль замка сверху четырьмя слоями теплоизоляции (**ПЛАКАТ**). То есть на третьем этапе расчета меняется геометрия расчетной области. Для проведения такого усложненного расчета необходимо на стадии подготовки исходных данных получить два файла геометрии – без верхней теплоизоляции и с ней. После этого проводятся первые два расчета, как это было описано ранее. На третьем расчете меняется файл геометрии, на который накладываются начальные температурные и усадочные данные предыдущего расчета. Таким образом, приведенный пример показывает, что с помощью «Полигона» можно воспроизводить достаточно сложные цепочки технологических процессов.

### *3. Физические и усадочные свойства материала отливки*

Для проведения численных расчетов необходимо задать физические и усадочные свойства материала отливки.

Физические свойства содержатся в справочниках или в паспорте конкретного материала. Обычно в паспорте приводится коэффициент теплопроводности  $\lambda(T)$ , удельная теплоемкость  $C_p(T)$ , коэффициент линейного термического расширения  $\alpha(T)$ , плотность при комнатной температуре  $\rho_{20}$ . Эти данные относятся к диапазону температур, интересующему конструкторов и прочнистов. Для моделирования литейных процессов нужны свойства сплава при температурах вблизи солидуса и выше.

Для жаропрочных сталей и сплавов экспериментально с хорошей точностью можно определить только температуры солидуса и ликвидуса. В виду трудностей экспериментального определения всех остальных физических свойств в твердожидком состоянии, основным источником их получения обычно является расчет. Наиболее достоверным источником физических свойств сплавов в нашей ситуации являются термодинамические базы данных. Они позволяют

рассчитать диаграмму состояния и, как минимум, получить очень важную зависимость доли твердой фазы от температуры  $f_s(T)$  в твердожидкой зоне отливки (так называемый «путь кристаллизации»).

За неимением под рукой термодинамической базы данных, можно попытаться реконструировать (придумать) недостающие свойства.

### 3.1. Коэффициент теплопроводности

Для определения свойств твердой фазы вплоть до температуры солидус можно прибегнуть к экстраполяции данных, имеющихся в справочниках.

Для жидкой фазы свойства, как правило, неизвестны, поэтому приходится проводить экстраполяцию кривых в область выше температуры ликвидус, руководствуясь общими соображениями. Известно, например, что коэффициент теплопроводности расплава примерно на 25% ниже, чем у твердой фазы при той же температуре.

Для вычисления  $\lambda(T)$  в двухфазной зоне отливки необходимо знать изменение доли твердой фазы в интервале кристаллизации  $f_s(T)$ , которая может быть получена расчетным путем из диаграммы состояния.

В относительно больших объемах расплава перенос тепла осуществляется не только теплопроводностью, но и конвекцией. Конвективный тепловой поток может быть в 2-3 раза больше теплового потока, обусловленного теплопроводностью (рис. 1). В этом случае следует говорить об эффективном коэффициенте теплопроводности, учитывающем сложный теплоперенос в расплаве.

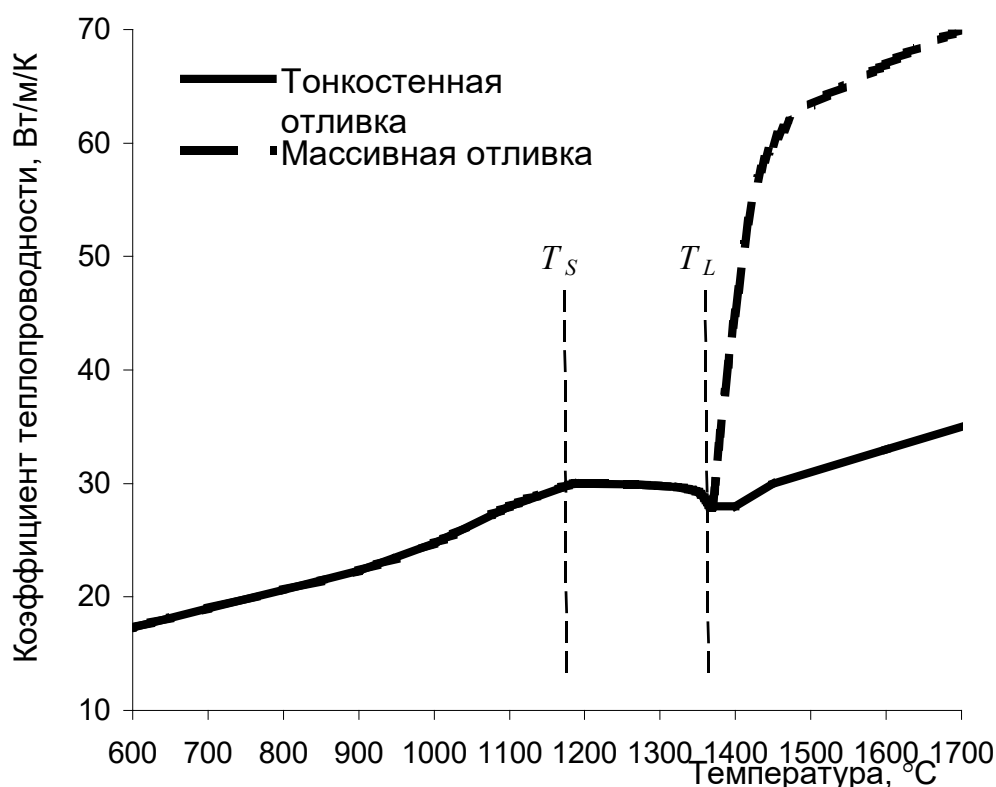


Рис. 1

### 3.2. Плотность

Плотность как функция температуры  $\rho(T)$  является важнейшим свойством сплава. В принципе, функция  $\rho(T)$  содержит почти всю необходимую информацию для моделирования процесса образования усадочной раковины и в значительной степени определяет макро и микропористость в отливке.

В системе «Полигон» информация о плотности сплава задается в неявном виде несколькими параметрами (рис. 2). Необходимо задать плотность сплава при температуре солидус  $\rho(T_s)$ , величину относительного изменения удельного объема  $\delta V_{SL}$ , коэффициент термического расширения расплава  $\beta_L$ , функцию  $f_s(T)$  и так называемый «спектр реализации усадки»  $\omega(f_s)$ .

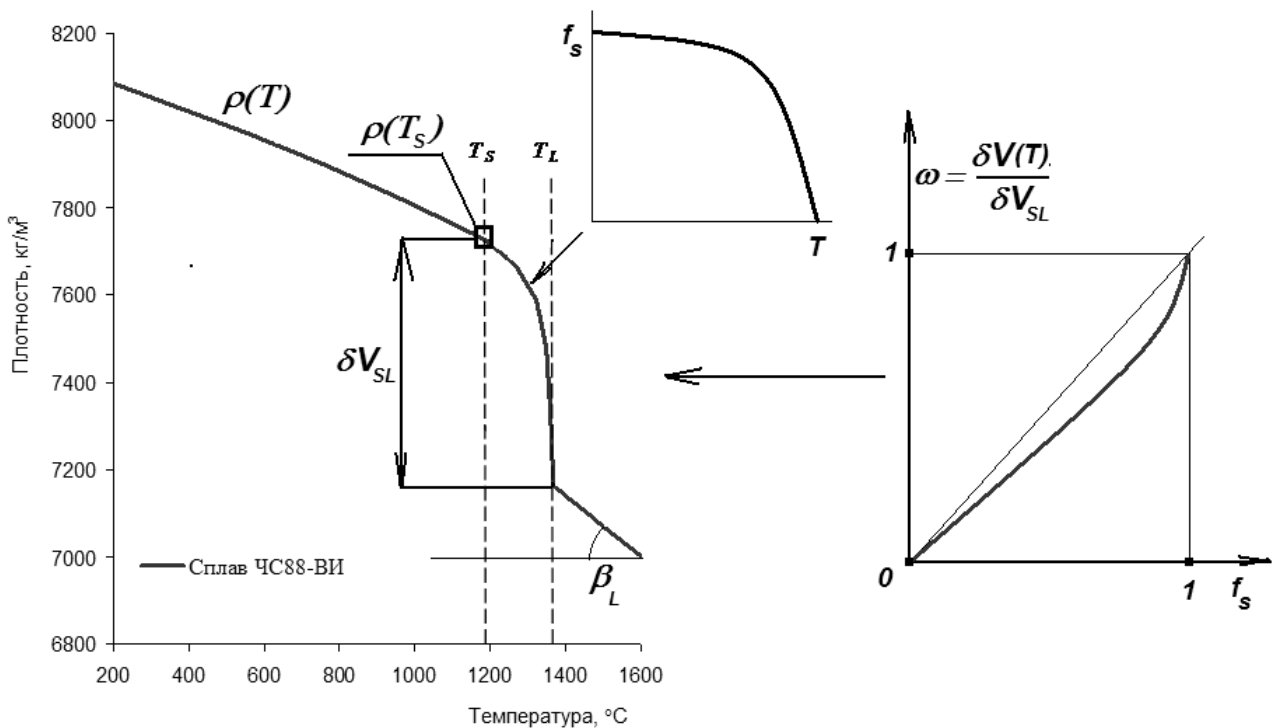


Рис. 2

Из перечисленных параметров  $\omega(f_s)$  зависит от функции  $f_s(T)$  (т.е. от того, как меняется количество твердой фазы при кристаллизации сплава), а также от величины  $\beta_L$ . Поэтому выбор  $\omega(f_s)$  не может быть произвольным, и, для того, чтобы правильно задать эту функцию, необходимо фактически реконструировать всю зависимость  $\rho(T)$ .

Плотность в твердом состоянии (рис. 3) может быть вычислена по известной зависимости  $\alpha(T)$ , экстраполированной до температуры солидус:

$$\rho_s(T) = \rho_{20}^{ucm} \left[ \left( 1 + 3 \int_{T_{20}}^T \alpha(T) dT \right) \right]^{-1}. \quad (1)$$

На основании известных значений плотности сплава при температуре солидус  $\rho(T_s)$  и литейной усадки  $\delta V_{SL}$  можно рассчитать плотности сплава при температуре ликвидус:

$$\rho(T_L) = \rho(T_S)(1 - \delta V_{SL}). \quad (2)$$

При известной величине коэффициента термического расширения расплава  $\beta_L$  нетрудно вычислить значения плотности расплава в интервале кристаллизации.

Если известна зависимость  $f_s(T)$ , то плотность сплава в интервале кристаллизации вычисляется по формуле:

$$\rho(T) = \frac{\rho_s(T)\rho_L(T)}{\rho_L(T)f_s + \rho_s(T)f_L}. \quad (3)$$

В этом выражении  $\rho_s(T)$  и  $\rho_L(T)$  - зависимости плотности твердой и жидкой фазы от температуры, полученные экстраполяцией кривой  $\rho(T)$  в область интервала кристаллизации.

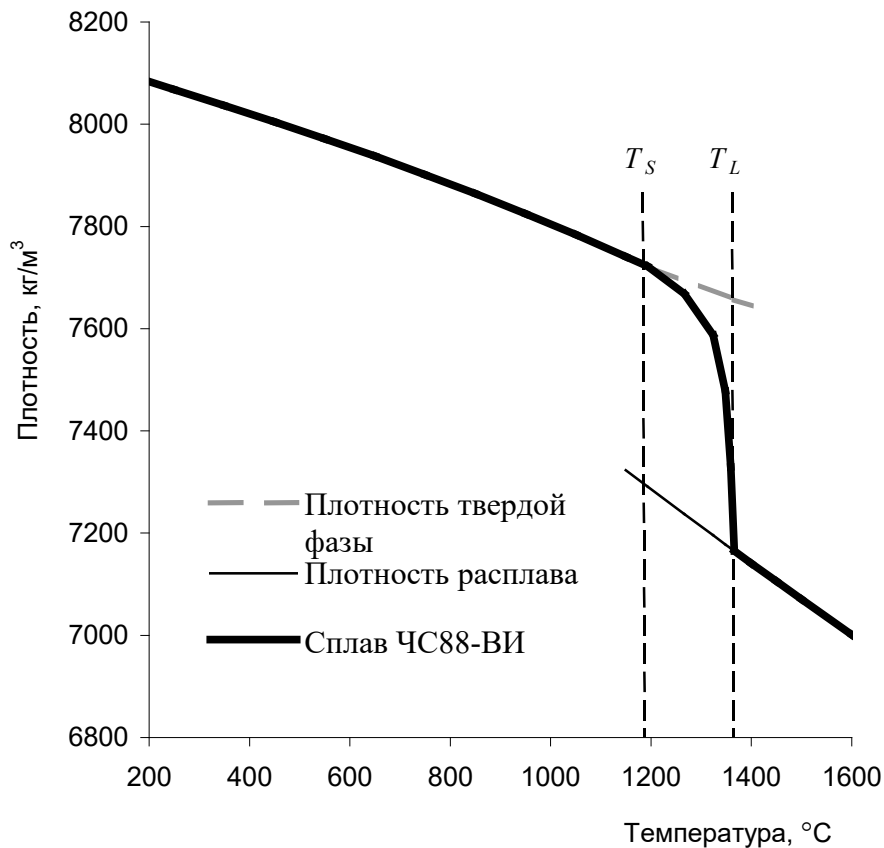


Рис. 3

### 3.3. Объемная усадка

Из литейных свойств в паспорте на материал обычно указывают литейную усадку  $\delta V_{справ}$ . Величина  $\delta V_{справ}$  является технической характеристикой, зависящей от условий ее определения. Для того чтобы получить физическую (истинную) величину изменения удельного объема  $\delta V_{SL}$ , входящую в перечень свойств, задаваемых в усадочной модели, необходимо знать истинный объем расплава при начале кристаллизации и истинный объем полученной твердой отливки вблизи солидуса. Для определения объема расплава необходимо учесть его термическое сжатие при охлаждении от температуры заливки до температуры ликвидус. Для определения истинного объема отливки необходимо при-

нать во внимание, что полученная в эксперименте проба металла имеет пористость, объемная доля которой зависит от условий кристаллизации.

Как показано на рис. 4, расхождение между величиной, приведенной в справочнике, и истинным значением, прежде всего, зависит от пористости закристаллизованной пробы. Погрешность, вносимая объемным расширением расплава, при любых значениях этого коэффициента не будет больше 1% по абсолютной величине, в то время как каждый процент пористости отливки вносит примерно такую же погрешность в искомую величину  $\delta V_{SL}$ .

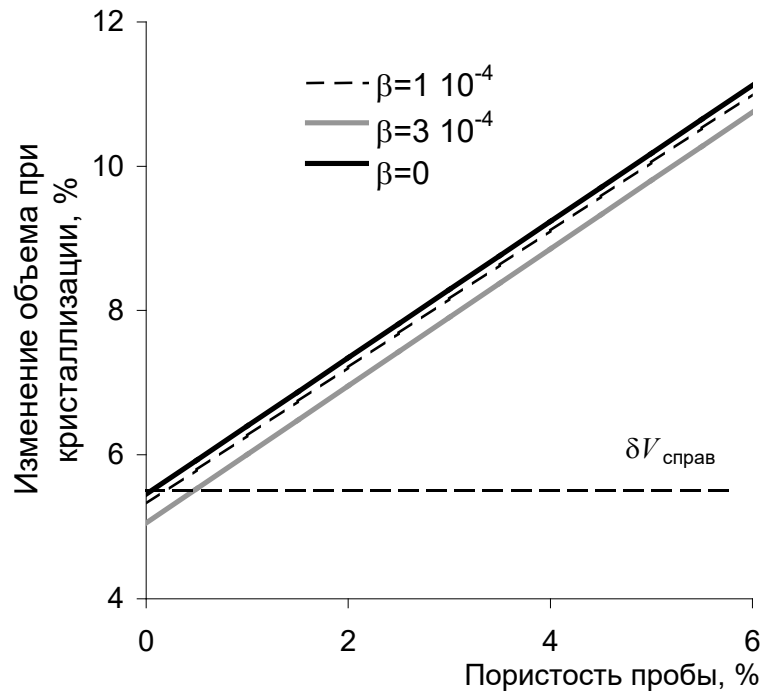


Рис.4. Истинное изменение объема при кристаллизации при видимой величине изменения 5.4%

### 3.4. Спектр усадки

В системе «Полигон» усадочные свойства сплава определены плотностью при температуре солидус  $\rho(T_s)$ , величиной относительного изменения объема металла  $\delta V_{SL}$  и относительным изменением объема сплава в зависимости от доли твердой фазы  $\delta V(f_s)$ . Последняя функция в системе «Полигон» представлена в виде:

$$\delta V(T) = \delta V_{SL} \omega(f_s), \quad (4)$$

где  $\omega(f_s)$  - распределение объемной усадки в интервале кристаллизации, т.е «спектр реализации усадки».

Эта безразмерная функция доли твердой фазы, изменяющаяся от 0 до 1, по мысли авторов, позволяет учесть особенности усадки при кристаллизации многофазных сплавов, когда коэффициенты усадки разных фаз могут отличаться друг от друга. В списке усадочных свойств сплава эта функция фигурирует как «спектр изменения объема». В случае равномерного распределения усадки в интервале кристаллизации предлагается задать  $\omega(f_s) = f_s$ .

Из зависимости плотности от температуры  $\rho_s(T)$  (1), можно получить относительное изменение объема сплава в интервале кристаллизации:

$$\delta V(T) = 1 + \frac{\rho_L(T_L)}{\rho_L(T)} \left[ \frac{\rho_s(T) - \rho_L(T)}{\rho_s(T)} f_s - 1 \right] \quad (5)$$

зная которое, можно рассчитать «спектр изменения объема»  $\omega(f_s) = \delta V(T) / \delta V_{SL}$ .

На рис. 5а представлены кривые доли твердой фазы в интервале кристаллизации и кривые «спектра изменения объема»  $\omega(f_s)$  (рис. 5б) для трех сплавов – алюминиевого сплава и двух жаропрочных никелевых сплавов – MAR-M509 и ЧС88-ВИ.

Приведенные здесь кривые  $\omega(f_s)$  существенно отличаются от прямой линии  $\omega(f_s) = f_s$ , хотя и учитывают только изменение плотности твердой и жидкой фазы только за счет термического расширения. Если же в интервале кристаллизации последовательно кристаллизуется несколько фаз с различной плотностью, реальная зависимость  $\omega(f_s)$  может оказаться еще более сложной.

### 3.5. Проницаемость дендритного каркаса

Формирование микропористости в отливке происходит в условиях затрудненного течения расплава сквозь дендритный каркас, формирующийся в двухфазной зоне отливки. Важнейшей характеристикой этого течения является проницаемость дендритного каркаса для текущего расплава.

В САМ ЛП «Полигон» принято выражение для проницаемости дендритного каркаса виде:

$$K = K_0 \cdot \left( \frac{f_L}{f_s} \right)^2, \quad (6)$$

где  $K_0 = const$

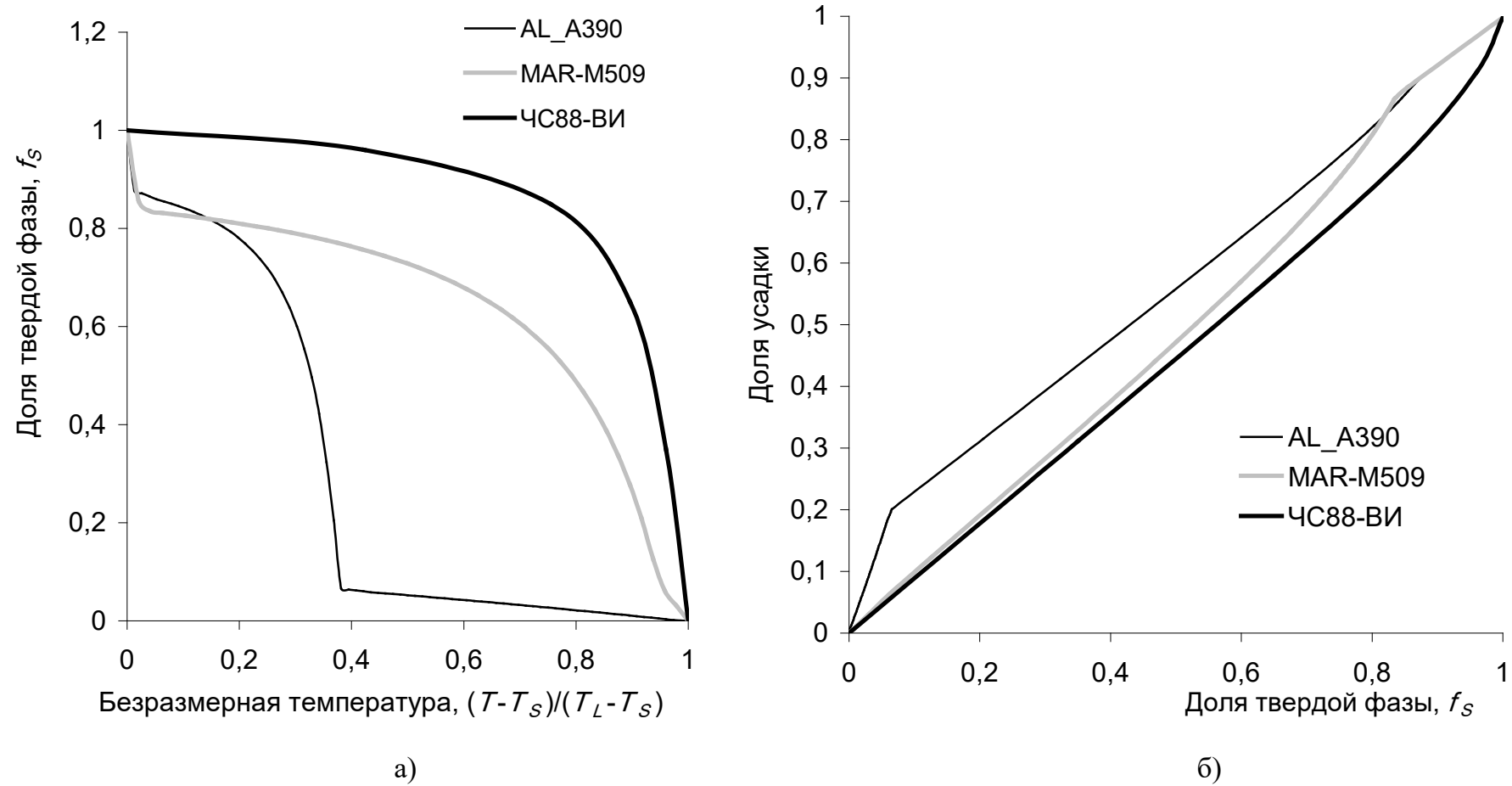
Величина параметра  $K_0$  существенно влияет на результат расчета микропористости в отливке. Понятно, что с увеличением скорости охлаждения расплава уменьшается расстояние между ветвями дендритного каркаса и растет сопротивление течению расплава. Для того чтобы выбрать правильное значение параметра  $K_0$ , нужно знать скорость охлаждения интересующей части отливки.

Пользуясь известной формулой Кармана для проницаемости пористой среды можно найти выражение для расчета параметра  $K_0$  для условий кристаллизации конкретной отливки:

$$K = \frac{(1 - f_s)^3 d^2}{180 f_s^2}, \quad d^2 \approx \lambda_l^2 f_L \quad (7)$$

$$K_0 = \frac{\lambda_l^2 f_L^2}{180}$$

В этих выражениях  $d$  определяется расстоянием  $\lambda_l$  между первичными осями дендритов.



а)  
 б)  
 Рис. 5. а) изменение доли твердой фазы в интервале кристаллизации;  
 б) спектры реализации усадки сплавов на основе никеля и алюминия

На рис. 6 приведены кривые изменения параметра  $K_0$  в зависимости от скорости охлаждения расплава и доли жидкой фазы. Как видно из этого рисунка, сложность выбора  $K_0$  в виде константы связана с тем, что эта величина меняется как по высоте твердожидкой зоны отливки (т.е. в зависимости от доли жидкой фазы), так от условий кристаллизации (т.е. от скорости охлаждения расплава).

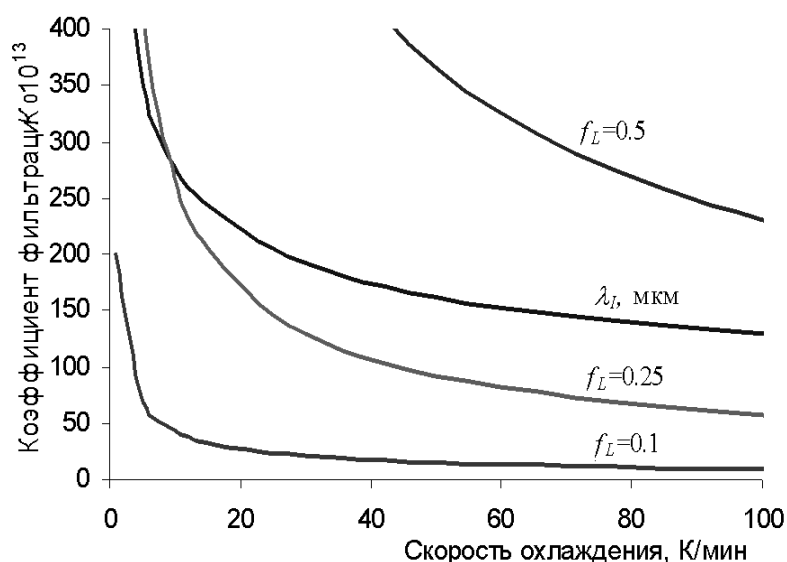


Рис. 6

Для получения адекватной картины микропористости в отливке, по-видимому, нужно проводить расчет дважды. По результату первого расчета оценивается скорость охлаждения в проблемном месте отливки и выбирается соответствующее значение  $K_0$ . Предполагается, что доля жидкой фазы, при которой происходит формирование микропористости, приблизительно равна 0.1. Второй расчет, проведенный при выбранном значении  $K_0$ , дает прогноз микропористости в отливке.

#### 4. Результаты моделирования пористости. Размер пор

По мере утолщения дендритов, пространство, занимаемое расплавом, все более и более фрагментируется на отдельные объемы, разграниченные осями второго порядка. Объемная доля расплава, заключенная между двумя ярусами осей непрерывно уменьшается. По достижении некоторой объемной доли, проницаемость дендритного каркаса уменьшается на столько, что течение расплава в междендритных пространствах становится невозможным. Кристаллизации оставшегося расплава приводит к локальному падению давления в расплаве и, в случае достижения критической величины разрежения, возникновению зародыша поры.

Объем расплава, участвующий в образовании поры зависит от условий кристаллизации данного сечения отливки и параметров формирующегося здесь дендритного каркаса.

Будем считать, что элементарная дендритная ячейка, в которой происходит образование поры, локализована вокруг оси 1-ого порядка и имеет размеры  $2\lambda_I \times 2\lambda_I \times \lambda_{II}$  (рис. 2). Объем ячейки равен  $V_C = \lambda_I^2 \lambda_{II}$  или, принимая соотношение  $\lambda_{II} \approx 0.25\lambda_I$ ,  $V_C = \lambda_I^3$ .

Объем поры в момент достижения температуры солидуса равен:

$$V_p = V_C P, \quad (8)$$

где  $P$  - объемная доля поры в элементарной ячейке.

Если предположить, что пора имеет сферическую форму, тогда получаем диаметр поры  $D_p$ :

$$D_p = \lambda_I \left( \frac{6}{\pi} P \right)^{1/3} \quad (9)$$

Диаметр поры зависит от параметров дендритной ячейки, т.е. от расстояния между первичными и вторичными осями дендритов. Известно, что эти параметры зависят от скорости охлаждения расплава в двухфазной зоне отливки. Эти зависимости должны быть получены экспериментально. Для никелевых жаропрочных сплавов (типа ЖС26) существует экспериментальная зависимость  $\lambda_I$  от условий кристаллизации:  $\lambda_I = 600 \left( \frac{dT}{d\tau} \right)^{-1/3}$ , мкм.

Для расчета  $\lambda_I$  используется модуль «Критерий-3D». А для расчета размера пор нам пришлось написать собственный модуль, который берет данные по пористости из файла P3D и параметр дендритной ячейки из файла U3D, рассчитывает размер пор и сохраняет его снова в файле U3D. Этот файл можно визуализировать в модуле «Мираж-3D»

## *5. Определение теплофизических свойств материала на основе термодинамического расчета*

Наиболее реалистичным путем получения свойств сплава в зависимости от температуры и химического состава является расчет с помощью термодинамической базы данных, например, входящей в состав системы ProCAST.

Термодинамическая база данных последней версии системы ProCAST позволяет определить все теплофизические свойства, необходимые для моделирования процессов затвердевания – прежде всего, долю твердой фазы в интервале кристаллизации.

Использование этих данных напрямую в системе «Полигон» чаще всего невозможно, поскольку свойства сплава в этих двух программах различны. Для конвертации данных разработан модуль, совместимый с системой ProCAST на уровне файлов для расчета теплоемкости сплава при температуре солидус и теплоты кристаллизации сплава по зависимости энтальпии от температуры, а также относительного изменения объема сплава при кристаллизации по зависимости плотности от температуры.

## **Моделирование процесса разливки магниевых слитков на конвейере**

*Агалаков В.В., Кулинский А.И., (ОАО «АВИСМА», г.Березники),  
Абрамов А.А., Бройтман О.А. (ООО «Фокад», г.Санкт-Петербург)*

Цель моделирования заключалась в следующем:

- разработка схемы водяного охлаждения изложниц, обеспечивающего получение плотных слитков за счет их направленного затвердевания;
- выявление режима работы конвейера, обеспечивающего производительность не менее 2 тонн слитков в час;
- выявление условий, необходимых для увеличения производительности конвейера.

Ограничение: температура слитка при извлечении из изложницы не должна превышать 420<sup>0</sup>С.

### *1. Исходные данные:*

Материал изложницы – сталь марки 20Л.

Масса изложницы ≈ 95 кг.

Сечение охлаждающих трубок – 27 мм.

Температура воды на входе и выходе – 80 и 95<sup>0</sup>С.

Начальная температура изложницы – 80<sup>0</sup>С.

Магниевый сплав – АМ60В (ликвидус - 615<sup>0</sup>С, солидус - 430<sup>0</sup>С)

Начальная температура сплава – 700<sup>0</sup>С.

Количество изложниц на конвейере – 48 шт.

Извлечение слитка из 34-й изложницы.

### *2. Производительность 2 тонны в час, продолжительность цикла 1152 с.*

Первоначально в CAD-системе SolidWorks была построена геометрическая модель отливки и формы.

На следующем этапе для имеющегося геометрического образа объекта моделирования была сгенерирована конечно-элементная (КЭ) сетка в объёме отливки и формы. Полученная КЭ-сетка была импортирована в систему компьютерного моделирования литейных процессов «Полигон». В препроцессоре системы «Полигон» импортированная сетка редактировалась – модель ориентировалась в пространстве относительно вектора силы тяжести, назначались индексы границ и объёмов, производилась диагностика качества сетки, её автоматическая оптимизация и правка. Подготовленные конечно-элементная сетка затем передавалась в расчётные модуль – собственно процессор системы «Полигон». Полученная расчётная геометрическая модель представлена на рис. 1.

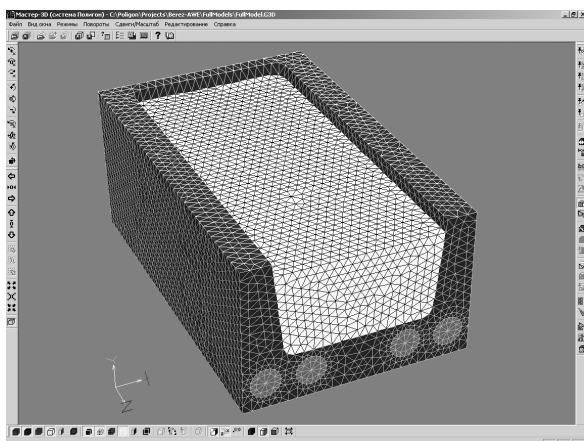


Рис. 1. Конечно-элементная модель слитка и элементов формы Слиток:  $m = 12$  кг. Изложница:  $m \approx 95$  кг

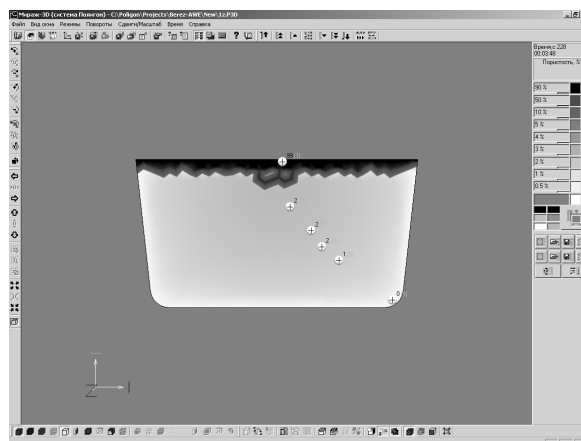


Рис. 2. Усадка в теле слитка (окончание первого цикла)

Процесс охлаждения и затвердевания расплава при принятых условиях на первом цикле происходит в течение 240 секунд направленно снизу вверх. Полученная динамика кристаллизации обеспечивает концентрированную усадку на поверхности слитка. Рассеянная пористость в центральной части слитка не превышает 2 % (рис. 2), что характерно для сплавов, затвердевающих в широком температурном интервале.

При продолжительности цикла 1152 с каждый шаг конвейера совершает за 24 секунды и, если выемка слитка из изложницы происходит на 34-м шаге, т.е. на 816-ой секунде, охлаждается изложница перед следующим циклом в течение 336 секунд.

Для оценки распределения температур в изложнице и в слитке при длительной (многоцикловой) работе конвейера были построены циклограммы в двух точках изложницы (рис. 3) и кривые охлаждения слитка на 1-м и 3-м циклах (рис. 4).

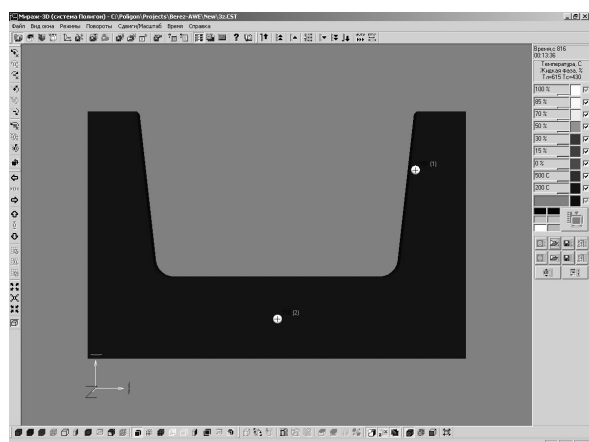


Рис. 3. Сечение формы с отмеченными точками (номер 1 и 2), для которых строилась циклограмма

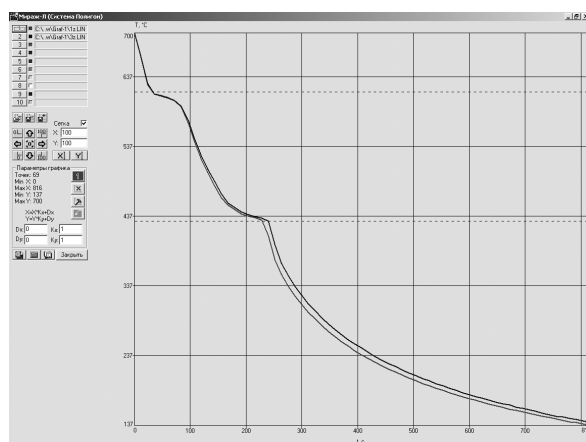


Рис. 4. Термические кривые для самой горячей точки в слитке (нижняя кривая – первый цикл, верхняя – третий цикл)

При исследованном режиме работы, температура изложницы стабилизируется уже на втором цикле и не превышает  $300^{\circ}\text{C}$  (рис. 5), а температура в самом горячем месте слитка на момент выемки его из изложницы составляет  $140^{\circ}\text{C}$  (рис. 4).

На третьем цикле начальное распределение температур в изложнице обеспечивает еще большую направленность кристаллизации, при увеличении продолжительности затвердевания до 252 секунд. Соответственно и распределение усадки более благоприятное (рис. 6).

### 3. Производительность 4,78 тонны в час, продолжительность цикла 432 с

В связи с тем, что принятая схема охлаждения изложницы при производительности конвейера 2 тонны в час обеспечивает температуру слитка в момент выемки его из изложницы только  $140^{\circ}\text{C}$  (допускается не выше  $420^{\circ}\text{C}$ ), продолжительность одного шага конвейера была уменьшена от 24 до 9 секунд. При этом продолжительность одного цикла составляет 432 секунды, выемка слитка из изложницы производится на 306 секунде, а продолжительность охлаждения изложницы до следующего цикла составляет 126 секунд.

Указанный режим работы конвейера также как и при штатном режиме обеспечивает направленность кристаллизации слитка снизу вверх. Усадка сосредоточена на поверхности слитка, а пористость центральной части слитка не превышает 2 %.

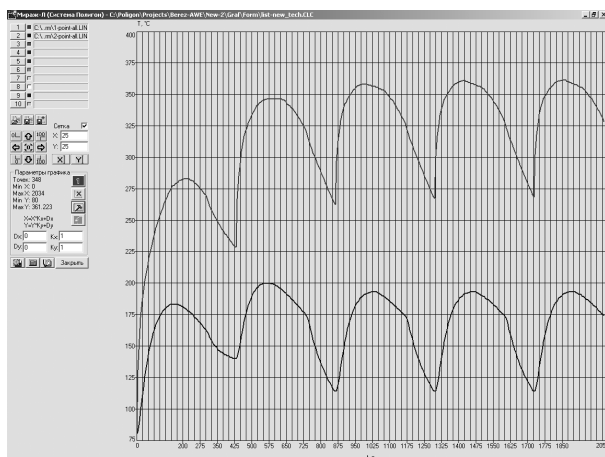


Рис. 7. Циклограмма работы изложницы при ускоренном движении конвейера (верхняя кривая – график для точки 1, нижняя – для точки 2)

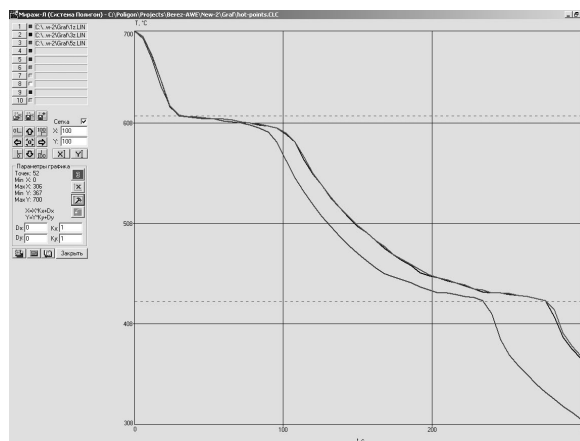


Рис. 8. Термические кривые при ускоренном движении конвейера для самой горячей точки в теле слитка (нижняя кривая – первый цикл, две верхние совпадающие кривые – третий и пятый циклы)

В соответствии с циклограммой температурный режим формы стабилизируется на третьем цикле при максимальной температуре формы  $360^{\circ}\text{C}$  (рис. 7), а температура слитка на момент выемки его из изложницы не превышает  $360\text{--}370^{\circ}\text{C}$  (рис. 8).

а) Выбранная конструкция и размеры изложницы с размещением охлаждающих трубок в ее донной части (рис. 9) обеспечивает направленную кристаллизацию слитка снизу вверх.

б) Производительность литейного конвейера может быть увеличена до 4,8-5,0 тонн в час за счет увеличения скорости вращения конвейера. При такой производительности температурный режим изложницы стабилизируется на третьем цикле, а температура слитка при его выемке из изложницы не превысит  $400^{\circ}\text{C}$ .

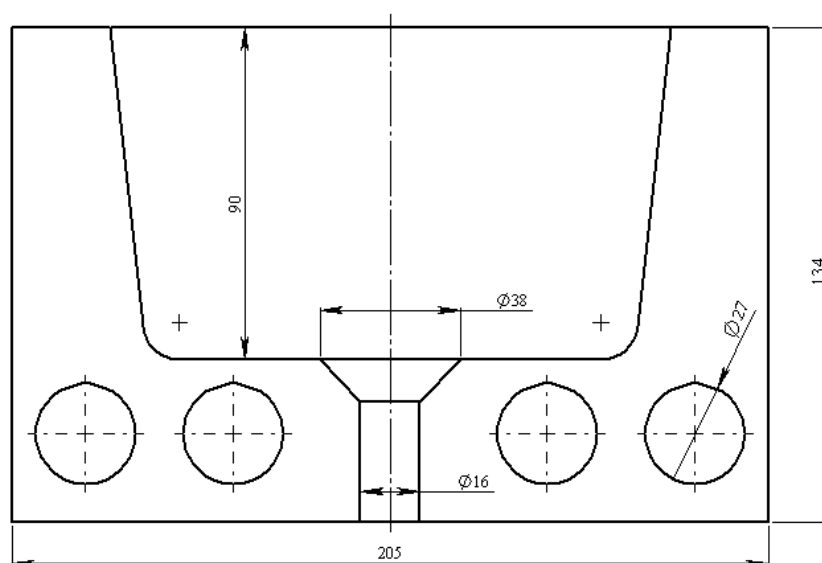


Рис. 9. Основные рекомендуемые размеры изложницы

## **Моделирование процесса полунепрерывной разливки крупногабаритного магниевого слитка**

*Агалаков В.В., Кулинский А.И. (ОАО «АВИСМА»),*

*Абрамов А.А., Бройтман О.А. (ООО «Фокад»)*

Ставилась задача компьютерного моделирования средствами САМ ЛП «Полигон» процесса полунепрерывного литья крупногабаритных слитков из сплава AZ31В следующей номенклатуры:

- Т-образный с габаритами в сечении 864х306 мм;
- прямоугольный с размерами в сечении 865 х 310 мм;
- круглый диаметром 387 мм;
- круглый диаметром 545 мм;
- круглый диаметром 670 мм.

Исследованы различные температуры литья  $t_l$  (начальная температура металла в тигле 660°C, 680°C и 700°C) и скорости литья  $V_l$  (интервал 20–50 мм/мин). В результате компьютерного моделирования выявлены следующие теплофизические и технологические условия процесса:

- исследованы температурные поля в слитках;
- определено необходимое время выдержки металла в кристаллизаторе до начала движения затравки;
- определено время стабилизации процесса;
- выявлена конфигурация и определены размеры лунки жидкого металла при различных режимах процесса;
- определен перепад температур по ширине слитков на выходе из кристаллизатора;
- определены допустимые скорости движения затравки (скорости литья) для различных температур жидкого металла;
- определена необходимая высота кристаллизатора для обеспечения высокой скорости литья 60 мм/мин.

### **Теплофизические характеристики сплава AZ31В:**

- плотность 1780 кг/м<sup>3</sup>;
- удельная теплоемкость 1040 Дж/кг·К;
- теплота затвердевания 320410 Дж/кг;
- теплопроводность (известна температурная зависимость) 96 - 105 Вт/м·К;
- температура ликвидуса 630°C;
- температура солидуса 566°C.

### **Технологические условия литья:**

- в начале работы установки затравка находится в кристаллизаторе на расстоянии 24 мм от керамического камня и чаша над кристаллизатором заполнена жидким металлом.
- движение затравки начинается при формировании литейной корки на слитке вплоть до верха кристаллизатора (высота кристаллизатора 65 мм).
- при выходе из кристаллизатора производится водяное охлаждение слитка
- протяжка на 1025 мм, вплоть до попадания в ванну с водой.
- при установившемся режиме литья температура на поверхности слитка на нижней кромке кристаллизатора должна быть ниже солидуса на 15-20°C.

В «Полигоне» имеется возможность решения динамической задачи – задания различным образом прогретых слоёв разной высоты, окружающих отливку (слиток), перемещающихся с заданной скоростью (закон изменения скорости может быть любым). В данном случае различали следующие слои: тигель, в котором поддерживалась неизменная температура жидкого металла; кристаллизатор; область водяного охлаждения; ванна с водой. Для выявления эффективного коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  в системе кристаллизатор - прослойка масла - слиток проводили вычислительный эксперимент, в результате которого определено  $\alpha=650 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ .

Некоторые этапы работы проиллюстрированы на примере Т-образного слитка 864x306 мм на рис. 1-3.

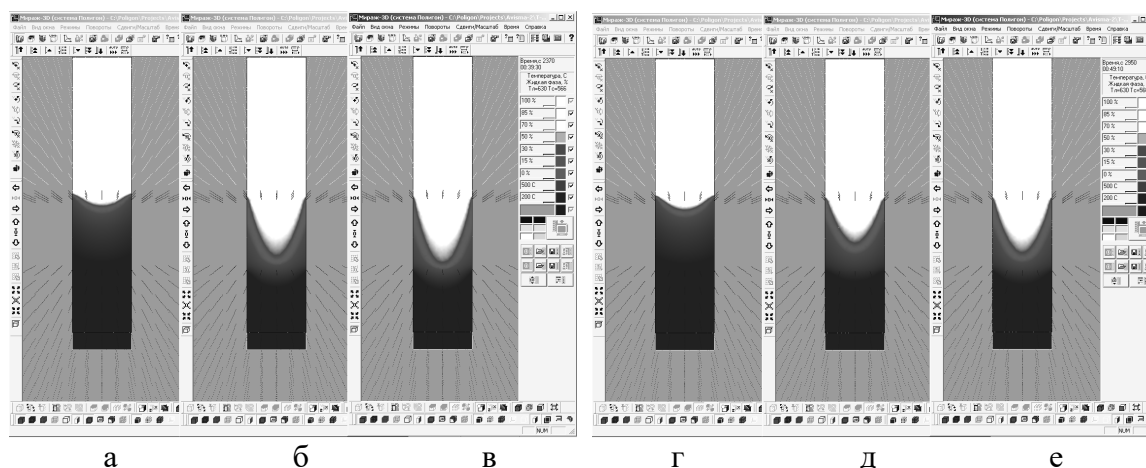


Рис. 1. Работа установки в установившемся режиме (показано сечение слитка и затравки) на 1/4 высоты слитка

- а – исходная температура 660°, скорость 20 мм/мин, глубина лунки – 120 мм,  
 б – 660°C, 45 мм/мин, 710 мм; в – 660°C, 50 мм/мин, 820 мм;  
 г – 700°C, 20 мм/мин, 160 мм; д – 700°C, 35 мм/мин, 570 мм; е – 700°C,  
 40 мм/мин, 690 мм

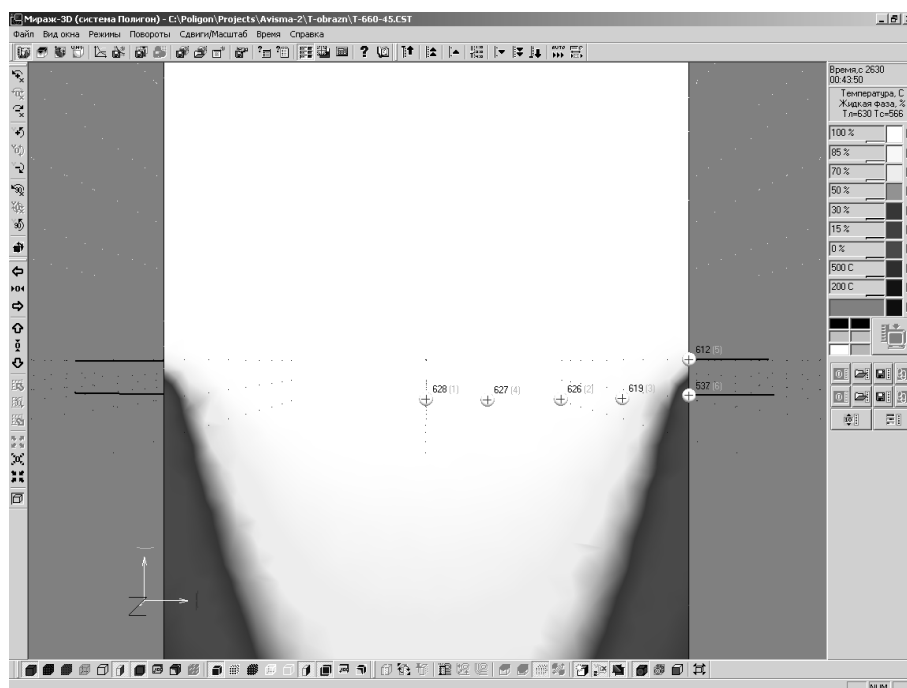


Рис. 2. Температурное распределение в зоне кристаллизатора и по сечению слитка при температуре литья  $660^{\circ}$ , скорости 45 мм/мин (оптимальная)

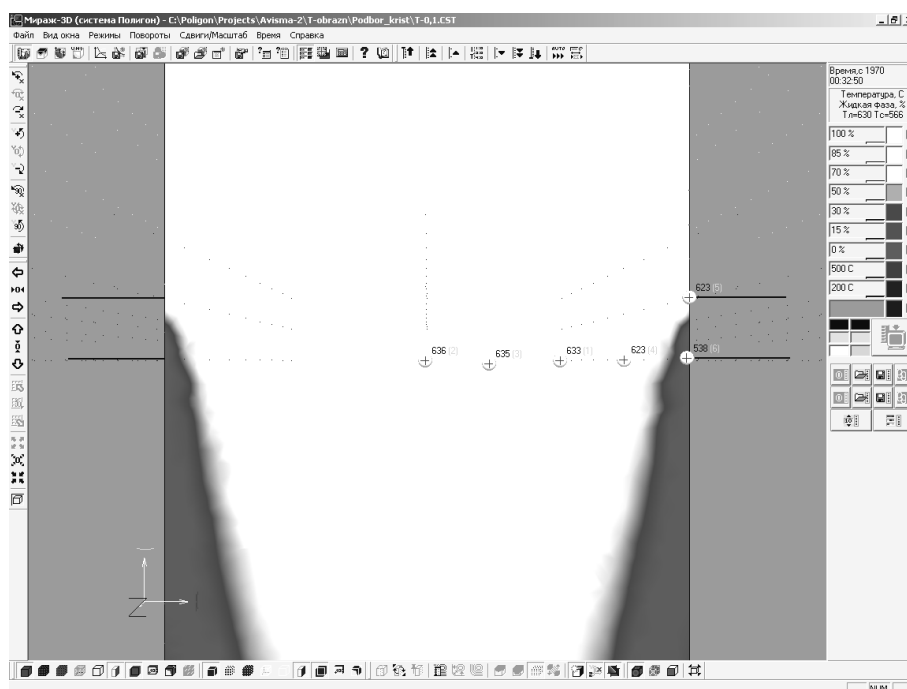


Рис. 3. Размер кристаллизатора 100 мм (оптимальный), скорость 60 мм/мин, начальная температура  $700^{\circ}\text{C}$

Основные рекомендованные технологические параметры обобщены в итоговой таблице (см).

Обнаружен эффект вторичного разогрева на  $8-9^{\circ}\text{C}$  литейной корки слитков ниже кристаллизатора (рис. 4-5), что связано, во-первых, с меньшей теплоотдачей в струе воды, чем в кристаллизатор, а, во-вторых, нали-

чением в лунке жидкой фазы с температурой выше ликвидуса. На круглых слитках этот эффект проявляется в значительно меньшей степени (существенно лишь на самом крупном слитке), чем на Т-образных и прямоугольных, что связано с особенностями теплоотвода от тела круглого сечения.

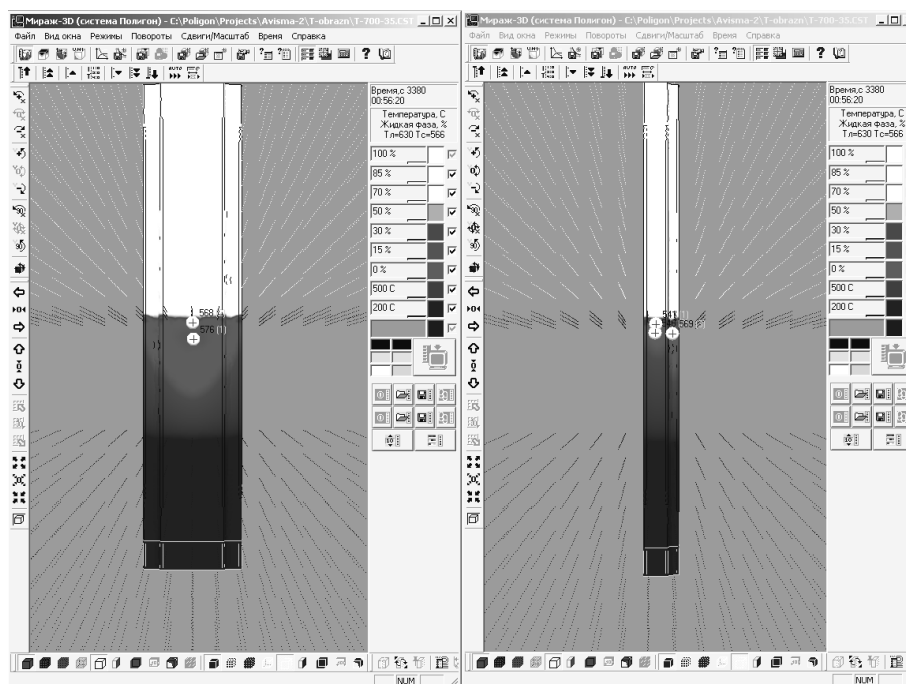


Рис. 4. Эффект вторичного разогрева литейной корки ниже кристаллизатора на Т-образном слитке (700°C, 35 мм/мин)

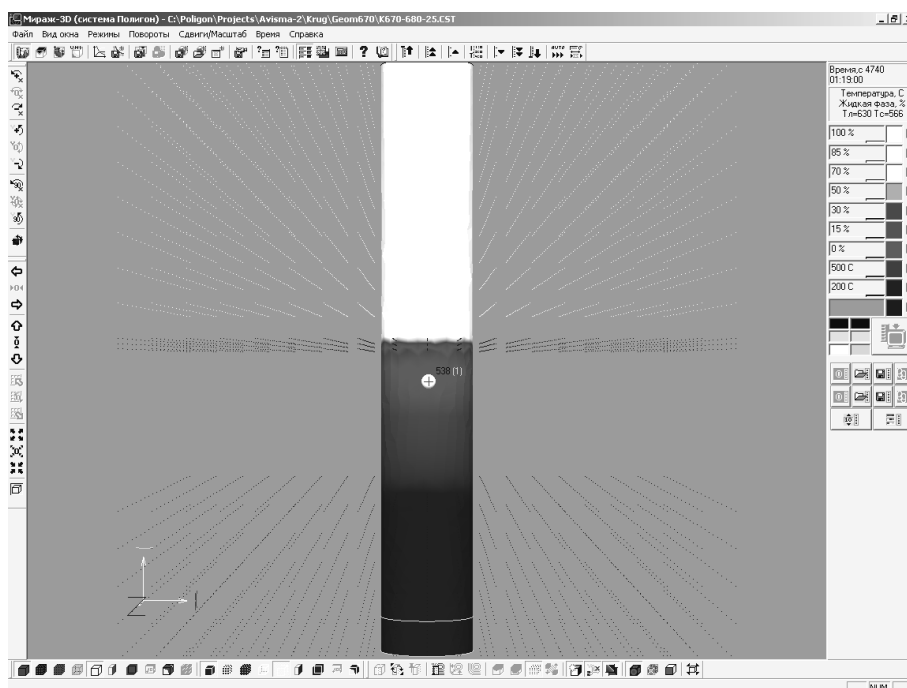


Рис. 5. Эффект вторичного разогрева корки ниже кристаллизатора на круглом слитке диаметром 670 мм (680°C, 25 мм/мин)

Таблица

## Технологические параметры полунепрерывного литья

|                                                            | $t_l, ^\circ\text{C}$ | Конфигурация слитка         |                             |                                 |                |                |                |
|------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                                                            |                       | Т-образный<br>864x306<br>мм | Т-образный<br>868x402<br>мм | Прямо-угольный<br>865x310<br>мм | Круглый        |                |                |
|                                                            |                       |                             |                             |                                 | Ø<br>387<br>мм | Ø<br>545<br>мм | Ø<br>670<br>мм |
| Время выдержки до начала литья, с                          | 660                   | 42                          | 74                          | 44                              | 42             | 54             | 56             |
|                                                            | 680                   | 50                          | 94                          | 54                              | 48             | 60             | 62             |
|                                                            | 700                   | 60                          | 124                         | 62                              | 62             | 70             | 70             |
| Оптимальная $V_l$ при высоте кристаллизатора 65 мм, мм/мин | 660                   | 45                          | 35                          | 35                              | 40             | 30             | 25             |
|                                                            | 680                   | 40                          | 35                          | 30                              | 35             | 30             | 25             |
|                                                            | 700                   | 35                          | 30                          | 30                              | 30             | 25             | 20             |
| Необходимая высота кристаллизатора при $V_l=60$ мм/мин, мм | 700                   | 100                         | 100                         | 115                             | 100            | 115            | 140            |

## **Моделирование затвердевания стальных слитков различной конфигурации**

*Хлямков Н.А., к.т.н. (ЦНИИ «Прометей», СЗТУ, Санкт-Петербург),  
Бройтман О.А. (ООО «Фокад», Санкт-Петербург)*

При производстве валов и роторов без осевого канала не всегда удаётся обеспечить высокие требования УЗК даже для слитков с конусностью 16%, отношением высоты (H) к диаметру (D) 1,1-1,4 и объёмом прибыли 22-26%. В стальных слитках такой конфигурации обеспечивается более высокая плотность металла в осевой зоне, незначительно развита V-образная зональная химическая неоднородность металла [1-7]. Нестабильность получения поковок без дефектов в осевом канале, вероятно, обусловлена допускаемыми отклонениями в технологии производства слитков.

Исследование влияния технологических факторов на затвердевание кузнечных слитков проведено с помощью методов математического моделирования технологических процессов с применением широко известного программного пакета «Полигон», основанного на методе конечных элементов [8-9]. Эта моделирующая система позволяет с высокой точностью исследовать влияние различных факторов на кинетику затвердевания металла в форме, выявить степень развития микро- и макропористости металла, определить изменение температуры при заливке, затвердевании отливки или слитка и т.д.

В настоящей работе исследовалось затвердевание широкой номенклатуры кузнечных и листовых слитков в зависимости от марки заливаемой стали (исследовались стали марок Ст3, 12Х18Н10Т, 38ХН3МФА), способа утепления прибыли, температуры нагрева конструктивных элементов изложниц, влияния примесных элементов, изменяющих температуру ликвидуса и солидуса. Остановимся подробнее на результатах расчётов для двух кузнечных слитков массой 13,6 и 136 т.

Исследование затвердевания слитка массой 13,6 т с отношением H/D = 2,0, конусностью 4% и объёмом прибыли 18% показало, что под прибылью слитка образуется мост плотного металла, ниже которого получает развитие рыхлота (рис. 1).

Для создания направленного затвердевания металла усилено утепление прибыльной части слитка за счет применения теплоизоляционной крышки и температуры нагрева футеровки прибыльной надставки. Принятые меры позволили существенно уменьшить развитие пористости металла в верхней части слитка. При изготовлении поковок со степенью укова 4 принятых мер оказалось достаточно для получения изделий с диаметром дефектов менее 2,5 мм.

При изготовлении поковок диаметром более 1400 мм из слитков массой 136 т со средним диаметром около 2500 мм обеспечивается величина укова около 4, но этого бывает недостаточно для получения поковок без дефектов в осевой зоне слитка. По существующей технологии перед отливкой крупных слитков нагревают поддон, изложницу, прибыльную надставку. Температура нагрева оснастки составляет от 200 до 400°С. После заливки зеркало металла в прибыли засыпают теплоизоляционной смесью. На одних заводах прибыль закрывают футерованной теплоизоляционной крышкой, а на других заводах не применяют теплоизоляционные крышки. Для выявления технологических факторов на форму и расположение усадочной раковины в отливке, а также развитие усадочной пористости проведено моделирование затвердевания одного из лучших по конструкции слитка массой 136 т (рис. 2).

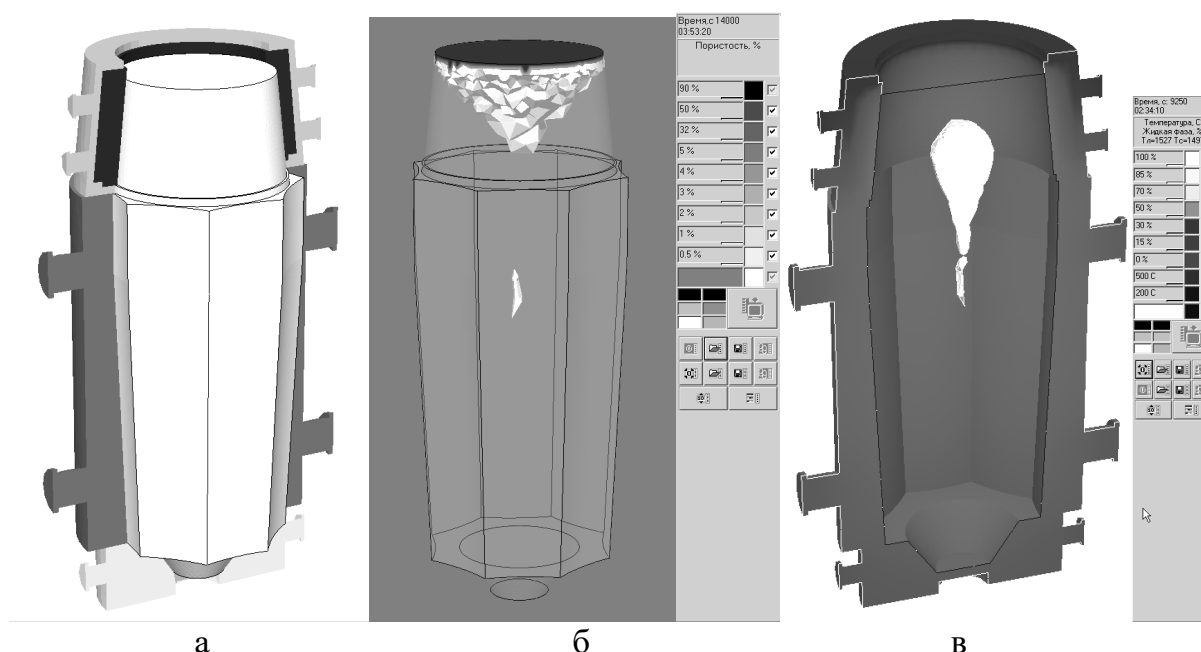


Рис. 1. Конфигурация (а), дефекты (б) кузнечного слитка массой 13,6 т. (СтЗ) и тепловые причины (в) образования осевой рыхлоты – формирование изолированных участков жидкой фазы

В качестве первого фактора было рассмотрено влияние температуры нагрева футеровки прибыльной надставки на формирование усадочной раковины и образование пористости в осевой зоне слитка. Рассмотрены два случая нагрева футеровки до температуры 200 и 700°С. В соответствии с принятой технологией нагрев футеровки должен быть до температуры не менее 200°С. Температура 700°С – это максимальная температура, которая может быть достигнута при нагреве природным газом, без использования специального оборудования.

Из проведенных расчетов следует, что после заливки металла на поверхности футеровки прибыльной надставки образуется тонкая корочка металла, ибо температура металла быстро понижается до температуры ликвидус. Однако, в течение 10 ч. температура на границе раздела фаз понижается на 8-10°C. Из этого следует, что количество тепла, отдаваемое металлом в единицу времени через единицу площади поверхности прибыли значительно превышает то количество тепла, которое способен материал футеровки отвести к кожуху прибыльной надставки.

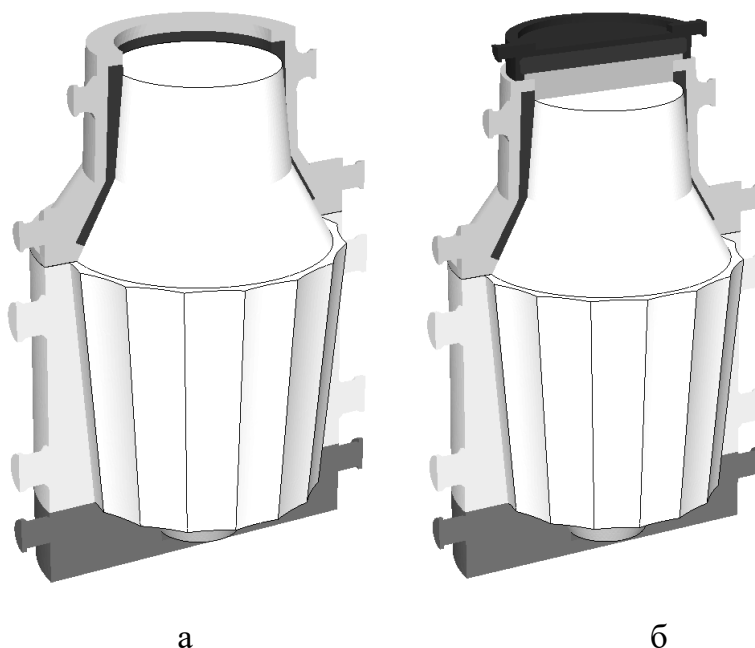


Рис. 2. Конструкции кузнечного слитка массой 136 т (38ХНЗМФА)  
а – без крышки; б – с крышкой

Повышение температуры футеровки с 200 до 700°C приводит к получению усадочной раковины, представляющей в нижней части параболу, а не конус (рис. 3). Расстояние от основания параболы до границы раздела прибыль - тело слитка составляет около 490 мм против 215 мм протяжённости этой «зоны запаса» в случае конической формы области усадки (рис. 3 а). Нагрев футеровки до 700°C приводит к увеличению общего времени затвердевания металла в прибыли (рис. 4)

Рассмотрены два случая утепления зеркала металла прибыли (рис. 2). В одном случае прибыль слитка засыпана теплоизоляционным материалом, а в другом – засыпана теплоизоляционным материалом и закрыта теплоизоляционной крышкой. Проведенные расчеты показывают, что усадочная раковина сосредоточена в прибыли слитка (рис. 5). Усадочная пористость отсутствует в теле слитка.

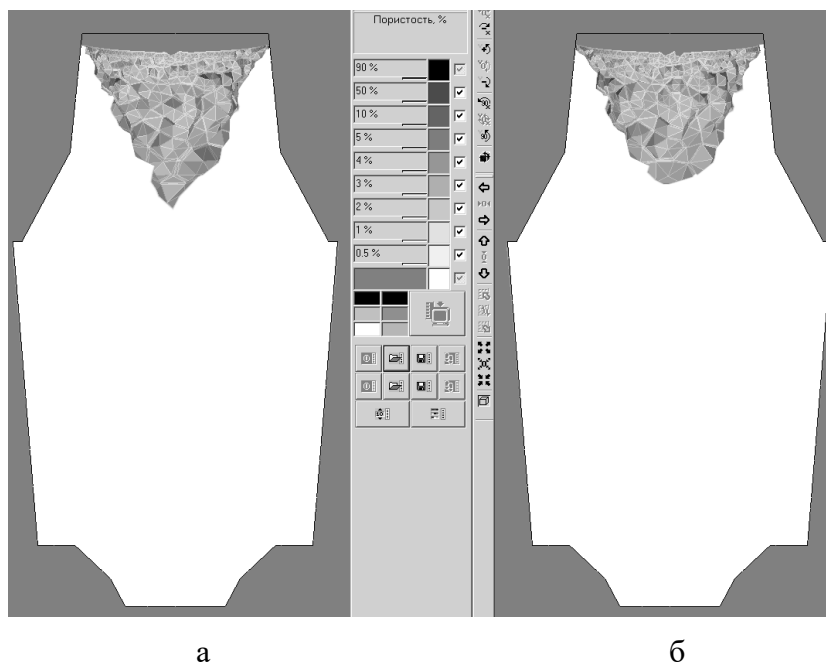


Рис. 3. Влияние разогрева футеровки в прибыльной надставке перед заливкой на вид и глубину дефектной зоны (изготовление слитка без теплоизоляционной крышки)

а – разогрев до 200°C; б – разогрев до 700°C

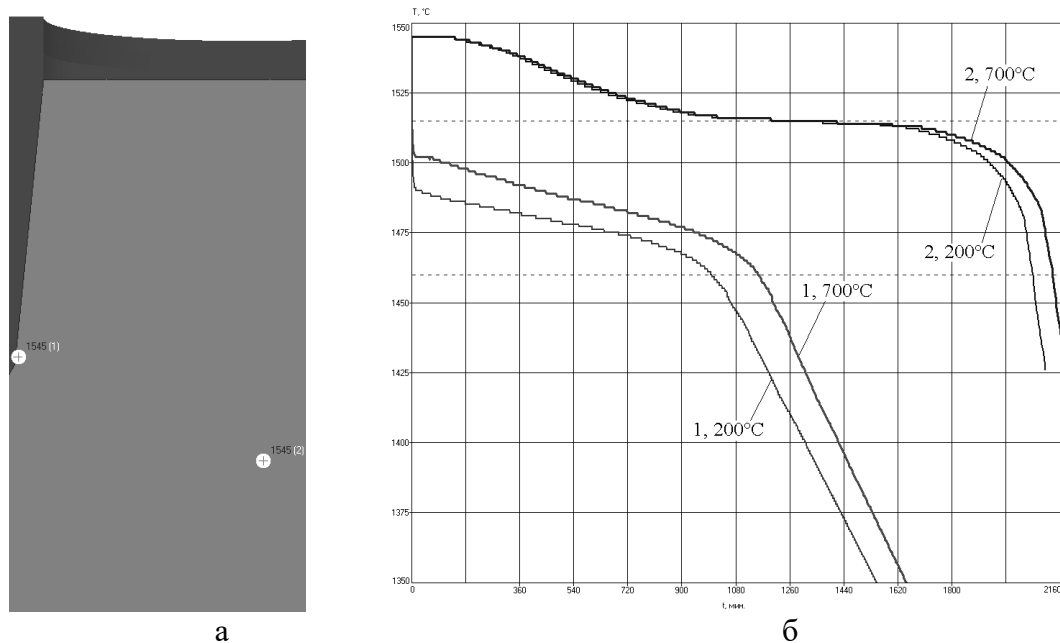


Рис. 4. Термические кривые (б), снятые в металле прибыли; расположение точек (а): 1 – у поверхности раздела с футеровкой; 2 – в осевой зоне

Расстояние между нижней точкой усадочной раковины и границей раздела прибыль - тело слитка составляет минимум 215 мм, что гарантирует отсутствие усадочной пористости в теле слитка. Применение теплоизоляционной крышки, существенно уменьшает отвод тепла с зеркала металла прибыли. Это приводит к увеличению в 3 раза расстояния от нижнего основания усадочной раковины до границы раздела прибыль – тело слитка. Нижняя часть усадочной раковины существенно изменяется. При использовании крышки усадочная раковина представляет собой усеченный конус. В слитке без теплоизоляционной крышки она имеет вид конуса. Из этого следует, что при уменьшении отвода тепла через верхнюю поверхность прибыли происходит более эффективное использование теплоизолирующей возможности футеровки прибыльной надставки, выполненной из шамотного кирпича.

Сочетание утепления зеркала металла слитка с нагревом футеровки прибыли до температуры 700°C позволяет вывести усадочную раковину в верхний конус прибыли слитка и использовать металл, находящийся в верхней части прибыли слитка.

Длительная выдержка расплавленного металла в прибыли слитка приводит разогреву верхней части изложницы. Температуры внутренней поверхности верхней части граней изложницы достигает около 1070°C. В зоне установки цапф температура поверхности граней несколько ниже и составляет около 1030°C. Опыт эксплуатации изложниц из серого чугуна показывает, что разгар граней в зоне цапф существенно меньше, чем на остальных гранях изложницы. Влияние цапф, прежде всего, проявляется на температуре рабочей поверхности изложницы, но практически не оказывает влияния на затвердевание металла слитка на глубине уже 150-200 мм от стенки изложницы (рис. 7). Определение температуры по высоте внутренней поверхности изложницы показало, что максимальная температура внутренней поверхности стенок изложницы достигается через 9-12 ч. после заливки (рис. 8). В верхней части изложницы она составляет 1000-1025°C, в нижней части соответственно 775-880°C. По высоте изложницы между нижними и верхними технологическими цапфами имеет место перепад температур в 250°C, который через 36 часов уменьшается до 225°C. По толщине стенки изложницы перепад температур составляет 90-110°C.

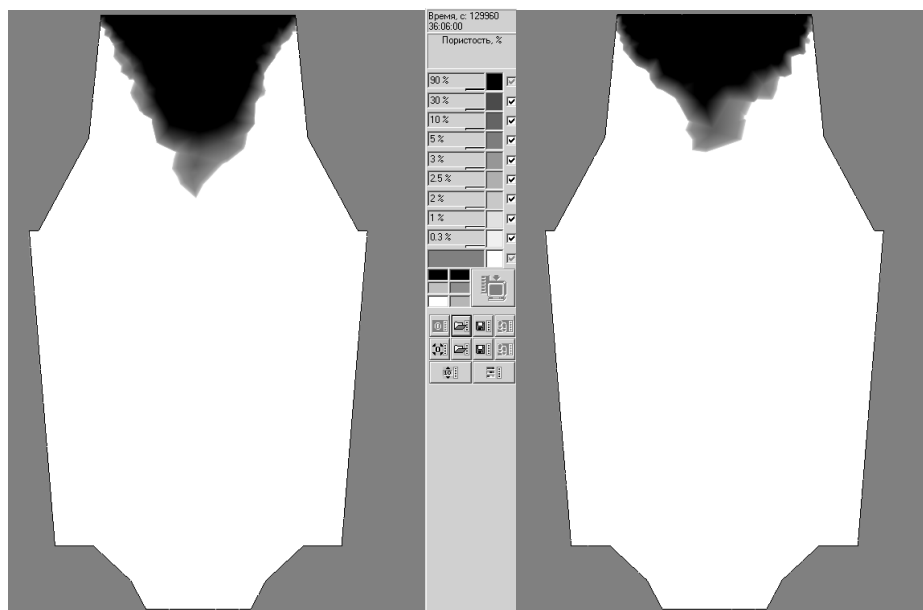


Рис. 5. Влияние наличия теплоизоляционной крышки  
а – без крышки; б – с крышкой



Рис. 6. Разгар стенок изложницы

а – критический момент – максимальные температуры на внутренней поверхности изложницы; б – максимальные температуры в изложнице на протяжении всего времени её работы (критериальная обработка полей температур)

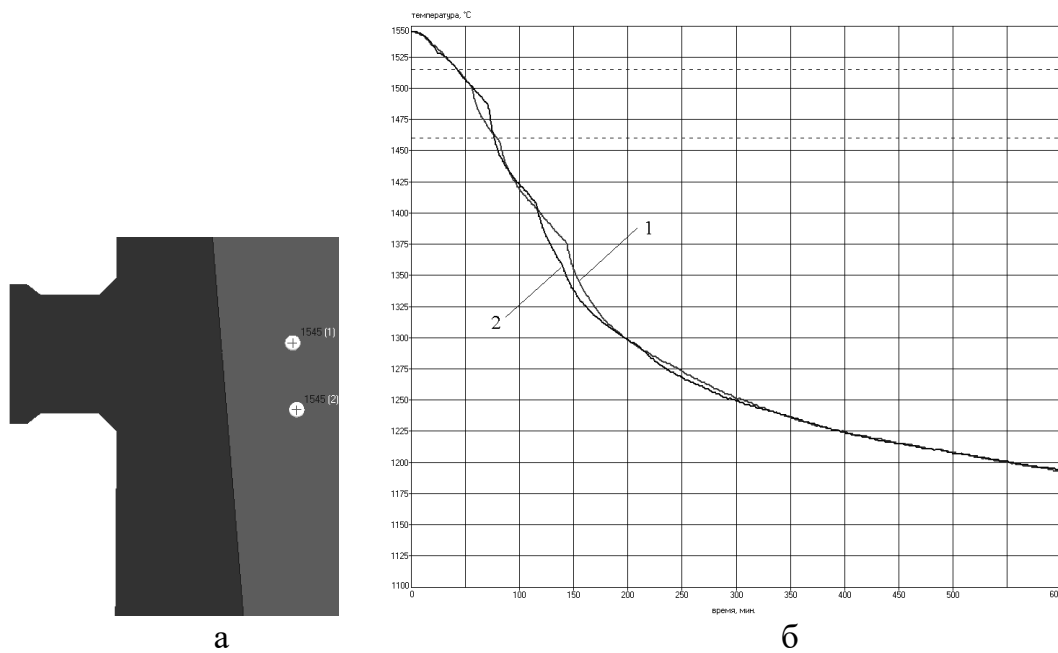


Рис. 7. Термические кривые (б), снятые в металле в зоне расположения цапф; расположение точек (а): 1 – на оси, идущей из центра цапфой; 2 – на оси, идущей от края цапфы

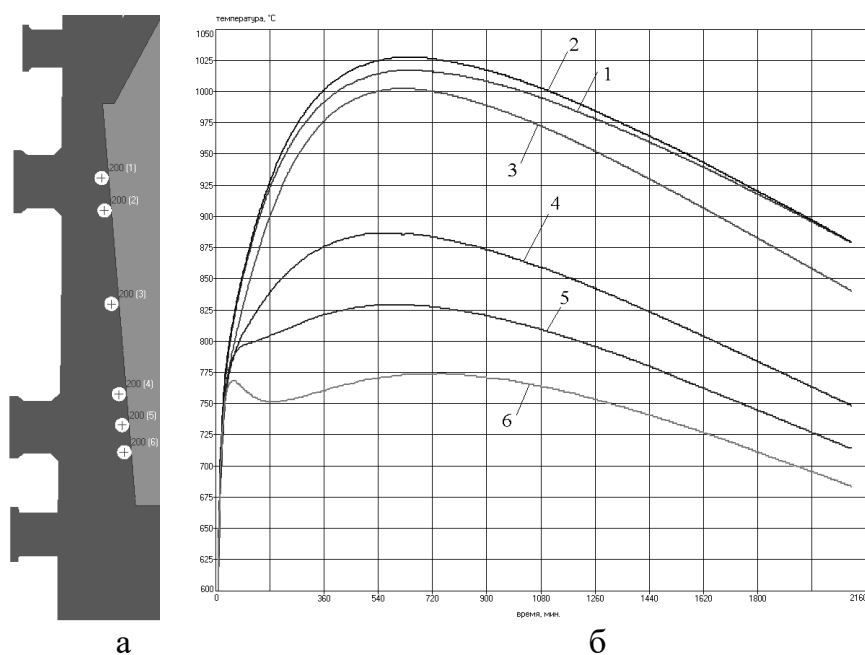


Рис. 8. Кривые изменения температур во времени (б), снятые в расположенных на различной высоте точках (а) у внутренней поверхности изложницы (нумерация точек сверху вниз)

Проведенные исследования температурных полей позволяют сделать практический вывод о необходимости корректирования подхода к установке цапф и проведения покраски верхних граней изложницы противопригарной краской, что позволит снизить тепловой поток от поверхности слитка к внутренней поверхности изложницы и увеличить её стойкость.

### Литература

1. Лебедев В.Н., Коровин В.М., Гринюк А.И. Физико- химические и теплофизические процессы кристаллизации стальных слитков. //Сб. Труды II конференции по слитку. М.: Metallurgy, 1967. с. 264-269.
2. Маслов А.М. Некоторые направления улучшения свойств крупного стального слитка. Проблемы стального слитка. //Сб. Труды III конференции по слитку М.: Metallurgy, 1969. с.245-248.
3. Дубов Н.Ф., Власов И.М., Король В.В. Разливка стали. М.: Metallurgy, 1975. 200 с.
4. Генерсон И.Г. Поковки из специальных сталей. Л.: Машиностроение, 1967. 312 с.
5. Ковка крупных поковок. Сборник. /Под ред. Трубина В.Н., Шелехова В.А. М.: Машиностроение, 1965. 296 с.
6. Тарновский И.Я., Трубин В.Н., Златкин М.Г. Свободная ковка на прессах. М.: Машиностроение, 1967. 328 с.
7. Дуб В.С., Лобода А.С., Хлямков Н.А., Красинский В.В., Литвак В.А., Горский А.В., Пыхтарь Л.К., Боровский О.Б., Пименов Г.А. Особенности строения крупных кузнечных слитков, отлитых из стали с различным содержанием примесей. //Сб. Metallurgical methods of improving the quality of steel М.: Metallurgy, 1979. с. 206-210.
8. Тихомиров М.Д. Основы моделирования литейных процессов. Тепловая задача. //Литейное производство, 1998. № 4. с. 30-34.
9. Тихомиров М.Д. Основы моделирования литейных процессов. Усадочная задача. //Приложение к журналу Литейное производство, 2002. № 12. с. 8-14

### Создание оптимизационной модели техпроцесса ЛВМ с использованием СКМ «Полигон»

*С.В.Жеглов, А.А.Щетинин (Воронежский государственный технический университет)*

На сегодняшний день методы и алгоритмы автоматизированного проектирования технологических процессов литья недостаточно изучены и нуждаются в постоянном развитии.

Имеется необходимость разработки новых методик автоматизации и совершенствовании существующих САПР ТП в литейном производстве.

В настоящее время не существует строгих правил проведения работ по оптимизации литейных процессов затвердевания. Поэтому одной из ключевых задач является совершенствование применяемой в большинстве случаев методики автоматизированного проектирования литейной технологии с использованием СКМ.

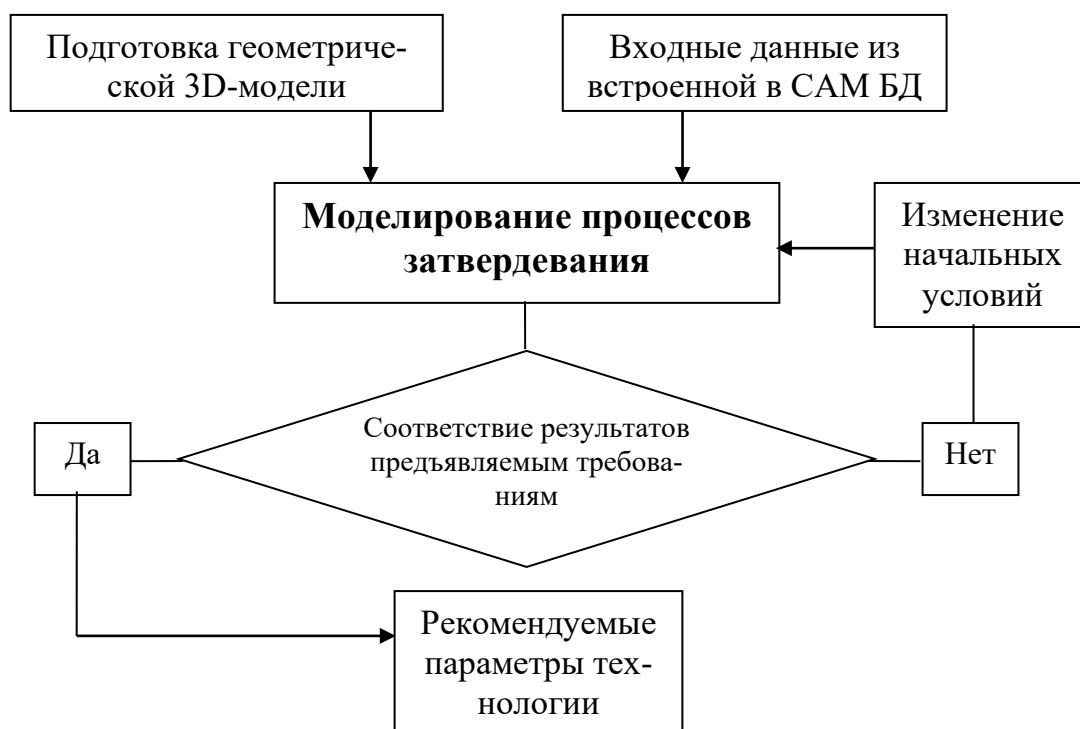


Рис.1. Методика автоматизированного проектирования литейной технологии на этапе «заливка-затвердевание»

Как видно из рис.1, существующими методами практически невозможно получить оптимальные параметры, т.к. в этом случае условием завершения проектирования является соответствие результатов расчета предъявляемым требованиям. Поэтому применяемая в большинстве случаев методика была усовершенствована (рис.2.).

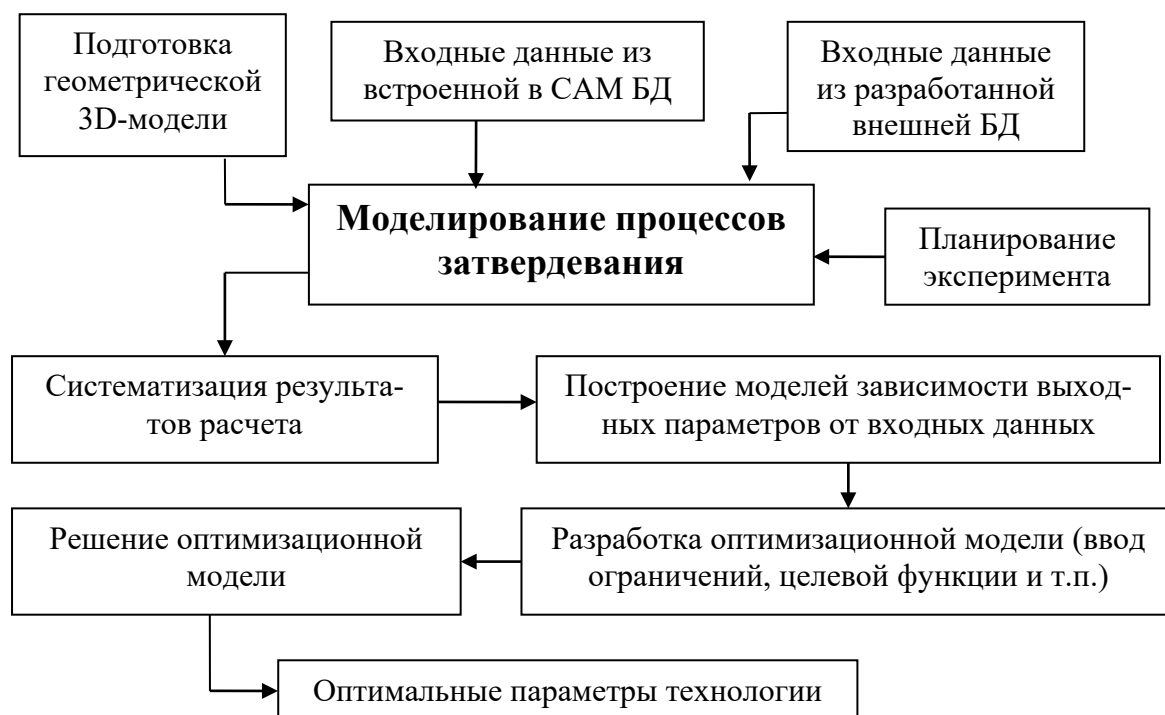


Рис.2. Предлагаемая методика автоматизированного проектирования литейной технологии на этапе «заливка-затвердевание»

Как видно из рисунков, основными отличиями предложенной методики от «стандартной» являются:

- использование планирования эксперимента в ходе проведения моделирования с целью построения моделей зависимости выходных параметров (уровни дефектов, температуры отливки, время затвердевания и т.п.) от исходных данных (температуры печи и формы, скорости перемещения и т.п.);
- разработка оптимизационной модели, задание условий и расчет оптимальных технологических параметров на этапе «заливка-затвердевание»;
- использование собственной внешней базы данных, позволяющей более адекватно учитывать особенности технологии.

Условием для завершения проектирования является решение оптимизационной модели, т.е. получение оптимальных параметров технологического процесса.

#### ***Исходные технологические параметры:***

Отливка типа «Корпус». Габаритные размеры:  $\varnothing 76 \times 100 \times 131$  мм, преобладающая толщина стенки - 4 мм. Материал - сплав ВНЛ-1 (08Х14Н7МЛ). Способ изготовления отливки: заливка металлом огнеупорной оболочки в вакууме на установке направленной кристаллизации.

Процесс направленной кристаллизации отливки обеспечивается за счет управляемого теплоотвода, а именно:

- 1) использованием водоохлаждаемого холодильника;
- 2) перемещением оболочки с затвердевающей отливкой из зоны нагрева с в зону охлаждения.

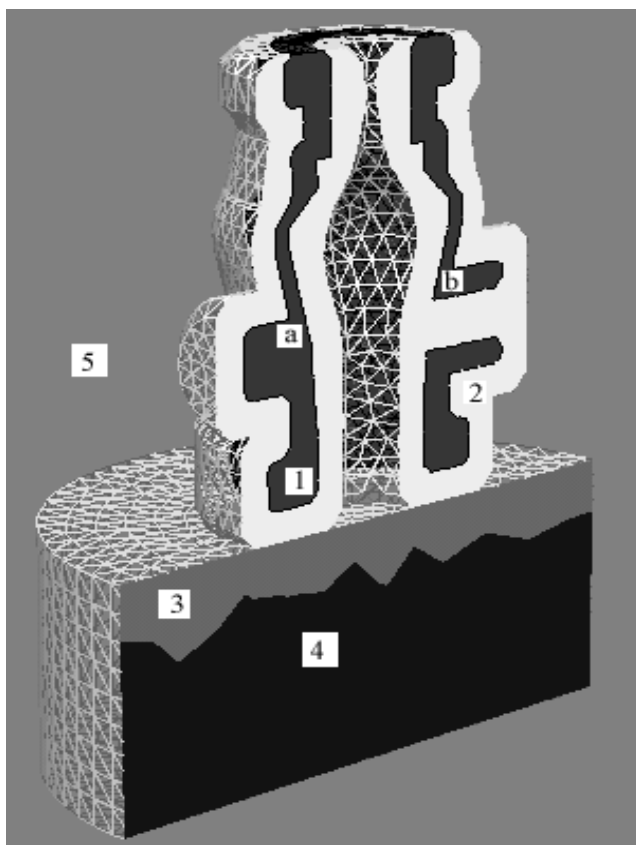


Рис.3. Геометрическая 3D-модель оболочки и формы в разрезе  
 1 - отливка; 2 - керамическая огнеупорная оболочка; 3 - медный водоохлаждаемый поддон  $\varnothing 180$  мм высотой 50мм и толщиной стенки 8 мм; 4 - вода, постоянная температура  $45^{\circ}$  С; 5 – термодинамическая среда; а – область в районе бобышки, потенциально подверженная пористости; б – область в районе фланца, потенциально подверженная пористости

Из полученных ранее результатов экспертного ранжирования было известно, что в наибольшей степени на процесс направленного затвердевания в вакуумной печи влияют начальные температур формы и отливки, а также скорость выведения затвердевающей отливки в зону охлаждения.

Построение моделей зависимости проводилось с использованием метода активного эксперимента. В условиях эксперимента основная цель заключается в извлечении максимального количества объективной информации о влиянии изучаемых факторов на производственный процесс с помощью наименьшего числа наблюдений.

Были просчитаны 27 вариантов технологии. Различия заключались в начальном распределении температур печи и формы, а также в динамическом режиме выведения оболочки из печи.

Время затвердевания (с) и уровень дефектов в точках а и б (%) при различных технологических условиях

Таблица 1

|                    |    | Т формы 800 °С                                  |                                                  |                                                 | Т формы 1100 °С                                 |                                                  |                                                 | Т формы 1400 °С                                 |                                                  |                                                 |
|--------------------|----|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|                    |    | Т средней части печи, °С                        |                                                  |                                                 | Т средней части печи, °С                        |                                                  |                                                 | Т средней части печи, °С                        |                                                  |                                                 |
|                    |    | 1500                                            | 1550                                             | 1600                                            | 1500                                            | 1550                                             | 1600                                            | 1500                                            | 1550                                             | 1600                                            |
| Скорость V, мм/мин | 20 | $Y_{VZ} = 714$<br>$Y_a = 0,06$<br>$Y_b = 0,2$   | $Y_{VZ} = 750$<br>$Y_a = 0,06$<br>$Y_b = 0,12$   | $Y_{VZ} = 810$<br>$Y_a = 0,13$<br>$Y_b = 0,28$  | $Y_{VZ} = 714$<br>$Y_a = 0,07$<br>$Y_b = 0,13$  | $Y_{VZ} = 750$<br>$Y_a = 0,03$<br>$Y_b = 0,2$    | $Y_{VZ} = 810$<br>$Y_a = 0,12$<br>$Y_b = 0,34$  | $Y_{VZ} = 714$<br>$Y_a = 0,03$<br>$Y_b = 0,1$   | $Y_{VZ} = 750$<br>$Y_a = 0,04$<br>$Y_b = 0,24$   | $Y_{VZ} = 810$<br>$Y_a = 0,17$<br>$Y_b = 0,22$  |
|                    | 12 | $Y_{VZ} = 1125$<br>$Y_a = 0,06$<br>$Y_b = 0,05$ | $Y_{VZ} = 1170$<br>$Y_a = 0,05$<br>$Y_b = 0,05$  | $Y_{VZ} = 1230$<br>$Y_a = 0,04$<br>$Y_b = 0,12$ | $Y_{VZ} = 1125$<br>$Y_a = 0,08$<br>$Y_b = 0,04$ | $Y_{VZ} = 1170$<br>$Y_a = 0,06$<br>$Y_b = 0,06$  | $Y_{VZ} = 1230$<br>$Y_a = 0,01$<br>$Y_b = 0,15$ | $Y_{VZ} = 1125$<br>$Y_a = 0,09$<br>$Y_b = 0,05$ | $Y_{VZ} = 1170$<br>$Y_a = 0,06$<br>$Y_b = 0,04$  | $Y_{VZ} = 1230$<br>$Y_a = 0,02$<br>$Y_b = 0,16$ |
|                    | 4  | $Y_{VZ} = 3060$<br>$Y_a = 0,07$<br>$Y_b = 0,08$ | $Y_{VZ} = 3120$<br>$Y_a = 0,03$<br>$Y_b = 0,099$ | $Y_{VZ} = 3210$<br>$Y_a = 0,06$<br>$Y_b = 0,04$ | $Y_{VZ} = 3060$<br>$Y_a = 0,07$<br>$Y_b = 0,08$ | $Y_{VZ} = 3120$<br>$Y_a = 0,03$<br>$Y_b = 0,095$ | $Y_{VZ} = 3210$<br>$Y_a = 0,06$<br>$Y_b = 0,02$ | $Y_{VZ} = 3060$<br>$Y_a = 0,07$<br>$Y_b = 0,08$ | $Y_{VZ} = 3120$<br>$Y_a = 0,03$<br>$Y_b = 0,096$ | $Y_{VZ} = 3210$<br>$Y_a = 0,06$<br>$Y_b = 0,02$ |

Целью следующего этапа работы являлся анализ полученных результатов и построение моделей зависимости времени затвердевания  $Y_{VZ}$ , уровня дефектов в точке а  $Y_a$  и уровня дефектов в точке б  $Y_b$  от скорости выведения отливки из зоны нагрева  $V$ , температуры оболочки  $T_1$  и температуры средней части печи  $T_2$  (таблица 1).

Наиболее существенными входными переменными (факторами) являются:  $X_1$  – скорость  $V$ ;  $X_2$  – температура оболочки;  $X_3$  – температура средней части печи.

Для каждой из переменных определены уровни варьирования отраженные в табл.2.

Таблица 2

Уровни варьирования переменных

| Уровень фактора               | $X_1$ мм/мин | $X_2$ , °С | $X_3$ , °С |
|-------------------------------|--------------|------------|------------|
| Базовый $x_{бi}$              | 12           | 1100       | 1550       |
| Верхний $x_{вi}$              | 20           | 1400       | 1600       |
| Нижний $x_{нi}$               | 4            | 800        | 1500       |
| Шаг варьирования $\Delta x_i$ | 8            | 300        | 50         |

Переменные переведены в безразмерный вид по формуле:

$$X_i = \frac{x_i - x_{0i}}{\Delta x_i} \quad (1)$$

В табл.3 показана матрица планирования и результаты эксперимента.

Таблица 3

Матрица планирования эксперимента

| 1 | X <sub>0</sub> | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | X <sub>12</sub> | X <sub>13</sub> | X <sub>23</sub> | X <sub>123</sub> | Y <sub>VZ</sub> | Y <sub>a</sub> | Y <sub>b</sub> |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------|----------------|
| 1 | +              | -              | -              | -              | +               | +               | +               | -                | 3060            | 0.07           | 0.2            |
| 2 | +              | +              | -              | -              | -               | -               | +               | +                | 714             | 0.06           | 0.2            |
| 3 | +              | -              | +              | -              | -               | +               | -               | +                | 3060            | 0.07           | 0.08           |
| 4 | +              | +              | +              | -              | +               | -               | -               | -                | 714             | 0.03           | 0.1            |
| 5 | +              | -              | -              | +              | +               | -               | -               | +                | 3210            | 0.06           | 0.04           |
| 6 | +              | +              | -              | +              | -               | +               | -               | -                | 810             | 0.13           | 0.28           |
| 7 | +              | -              | +              | +              | -               | -               | +               | -                | 3210            | 0.06           | 0.02           |
| 8 | +              | +              | +              | +              | +               | +               | +               | +                | 810             | 0.17           | 0.22           |
| b |                |                |                |                |                 |                 |                 |                  |                 |                |                |

На основании матрицы планирования были определены коэффициенты уравнения регрессии.

Модель зависимости уровня дефектов в точке а Y<sub>a</sub> может быть представлена в виде:

$$Y_a = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{123} X_1 X_2 X_3, \quad (2)$$

где  $\beta_0 = \frac{Y_{a1} + Y_{a2} + \dots + Y_{aN}}{N_L};$

$$\beta_i = \frac{z_{i1} Y_{a1} + z_{i2} Y_{a2} + \dots + z_{iN} Y_{aN}}{N_L};$$

$$\beta_{ij} = \frac{z_{ij1} Y_{a1} + z_{ij2} Y_{a2} + \dots + z_{ijN} Y_{aN}}{N_L};$$

$$\beta_{ijk} = \frac{z_{ijk1} Y_{a1} + z_{ijk2} Y_{a2} + \dots + z_{ijkN} Y_{aN}}{N_L};$$

N<sub>L</sub> – число линейных эффектов;

z<sub>i</sub>; z<sub>ij</sub>; z<sub>ijk</sub> – значения факторов в условиях переменных («+1» или «-1»)

В ходе решения получены следующие значения коэффициентов уравнения:  $\beta_0=0,8125$ ;  $\beta_1=0,01625$ ;  $\beta_2=0,00125$ ;  $\beta_3=0,02375$ ;  $\beta_{12}=0,00125$ ;  $\beta_{13}=0,02875$ ;  $\beta_{23}=0,00875$ ;  $\beta_{123}=0,00875$ .

Модели зависимости времени затвердевания Y<sub>VZ</sub>, уровня дефектов в точке а Y<sub>a</sub>, уровня дефектов в точке b Y<sub>b</sub> проверены с помощью F критерия Фишера.

В результате получены следующие модели:

$$\begin{aligned} Y_{VZ} &= 1194.25 - 96.0625 \times X_1 + 1.635 \times X_3 - 0.03375 \times X_1 \times X_3; \\ Y_a &= 10.63 - 0.116 \times X_1 - 0.009 \times X_2 - 0.0068 \times X_3 + \\ &+ 7.25 \times 10^{-5} \times X_1 \times X_3 + 5.208 \times 10^{-6} \times X_1 \times X_2 + 5.83 \times 10^{-6} \times X_2 \times X_3; \\ Y_b &= 4.77 - 0.19698 \times X_1 - 1.974 \times 10^{-3} \times X_2 - 2.96 \times 10^{-3} \times X_3 + 1.325 \times 10^{-4} \times X_1 \times X_3 \end{aligned} \quad (3)$$

По данным зависимостям была разработана оптимизационная модель, в которой в качестве целевой функции использовалось условие:

$$Y_{VZ} \rightarrow \min \quad (4)$$

Ограничения были представлены в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_a < A \\ Y_b < B \\ 800 \leq X_2 \leq 1400 \\ 1500 \leq X_3 \leq 1600 \end{array} \right. \quad (5)$$

где А и В заданный уровень дефектов в точках а и b, соответственно.

Решение полученной модели является задачей линейного программирования и выполняется стандартными методами.

С использованием построенной модели возможно определение оптимальных значений для важнейших технологических параметров изготовления отливок при заданном ограничении уровня дефектов. При условии, что уровень дефектов не превышает 0,1%, оптимальными параметрами являются: скорость выведения отливки из зоны нагрева  $X_1 = 18.1$  мм/мин; температура оболочки в момент заливки  $X_2 = 944$  °С; температура средней части печи  $X_3 = 1500$  °С.

В итоге проведенной работы были получены следующие результаты:

- комплекс регрессионных моделей зависимости времени затвердевания и уровня дефектов корпусных отливок от наиболее значимых параметров ТП ЛВМ, отличающийся возможностью прогнозирования развития усадочных процессов;
- оптимизационная модель ТП изготовления корпусных отливок методом ЛВМ с использованием установки направленного затвердевания на этапе «заливка-затвердевание», позволяющая задавать различные уровни дефектов и находить оптимальные сочетания температурно-временных параметров технологии;
- оптимальные значения динамического режима, температур печи и оболочки.

Предлагаемая методика автоматизированного проектирования литейных технологий отличается универсальностью и может быть применена к различным способам литья и конфигурациям отливок.

**Применение статистических методов анализа данных  
для оценки результатов процесса формирования усадочных дефектов  
в чугунных отливках.**

*А.В.Щетинин, А.А.Щетинин, С.В.Жеглов, В.В.Корнеева (Воронежский  
государственный технический университет)*

Вычислительный эксперимент во многом аналогичен натурному, роль экспериментальной установки играют специализированные вычислительные программы, которые получили название систем автоматизированного моделирования (САМ).

Наибольшее распространение получили САМ, основанные на следующих методах решения задач: метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР), метод конечных объемов (МКО). Другие численные методы также находят применение, но в более частных задачах. Разработанные САМ являются эффективными, если достоверность решения более 90%. Численные методы, реализованные в САМ позволяют достигать и более высокой точности, что связано с размерами дискретизации расчетной области, а также с возможностями вычислительной техники.

Достоинства численного моделирования очевидны – они дешевле натурального, в эксперимент можно легко и безопасно вмешиваться, эксперимент можно повторить и прервать в любой момент, в ходе эксперимента можно смоделировать условия, которые не реализуются на лабораторных установках. Поэтому в данной работе рассмотрены вопросы решения основной задачи технологического процесса формирования отливки – образование усадочных дефектов и способы их устранения, а также решается задача построения математической модели формирования пористости в форме с регулируемой скоростью отвода тепла.

Реализация вычислительного эксперимента была осуществлена в САМ ЛП «Полигон», которая основана на МКЭ, как наиболее адекватном методе решения усадочной задачи и задачи теплопроводности.

До проведения вычислительного эксперимента решаются задачи построения геометрической модели, дискретизация области отливки и формы. Непосредственно сам вычислительный процесс может занимать от нескольких минут до десятков часов, в зависимости от размеров модели и размеров элементарных областей. Даже при минимальном размере конечного элемента вычислительный процесс быстрее, чем натуральный. Построение моделей, дискретизация областей, проведение расчетов для отливок – трудоемкие процессы, на которые затрачивается много машинного времени и труда специалистов.

Проведение вычислительных экспериментов и построение по этим данным математической модели позволяет определить значения контролируемых параметров, по ряду исходных данных, что в свою очередь сокра-

тит время для поиска оптимальных начальных условий. То есть построенная математическая модель конструкции отливки не нуждается в построении геометрической модели, дискретизации области, вычислительных экспериментах, а требуется задать только теплофизические параметры литейного процесса.

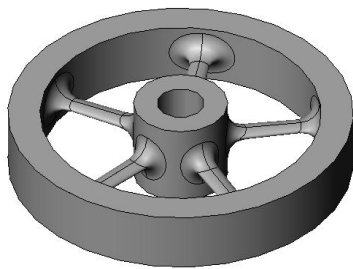


Рис.1 – Отливка

Для построения математической модели образования усадочных дефектов в литой заготовке, получаемой литьем в песчано-глинистые

формы, решаются следующие задачи:

- исследуется влияния теплофизических параметров литья на качество отливки;
- определяются модели процесса литья, описывающие изменения пористости в отливке под влиянием различных факторов.

В качестве типовой детали была выбрана деталь «Шкив» (рис.1), размеры которой определяются по ГОСТ 20889-88, ГОСТ 17383-73. Наиболее критичным местом в деталях таких конструкций является сопряжение спицы с ободом, поскольку в процессе построения отливки в большинстве случаев не учитывается соотношения толщин обода и спиц.

Следствием изменения размеров в результате усадки металл являются усадочные дефекты – раковины, макро- и микропористость.

Основными факторами влияющими на усадочные дефекты являются:

- конструкция формы (наличие охлаждающих вставок и их эффективность);
- конструкция литниковой системы;
- свойства формы;
- температура заливки;
- химический состав металла.

Для выравнивания скорости отвода тепла от спицы и обода, под обод был установлен холодильник (рис.2). Толщина холодильника изменялась  $0 \leq x_n \leq 2R$ . Таким образом определялось оптимальное значение толщины холодильника.

Материалом отливки выбран рекомендуемый стандартом для данного типа деталей серый чугун СЧ-20. Определена оптимальная литниковая система с тангенциальным подводом металла и горизонтальной линией разъема формы [1]. Материалом формы выбрана сухая песчано-глинистая смесь со следующими параметрами: теплоемкость формы изменяется в пределах 770-1160 кДж/(м<sup>3</sup>К) при температуре от 100 до 1000°C; теплопроводность формы изменяется в пределах 0,59-1,06 Вт/(мК) при температуре от 100 до 1400°C.

Температура заливки металла изменялась в интервале от 1300 до 1400 °С [2].

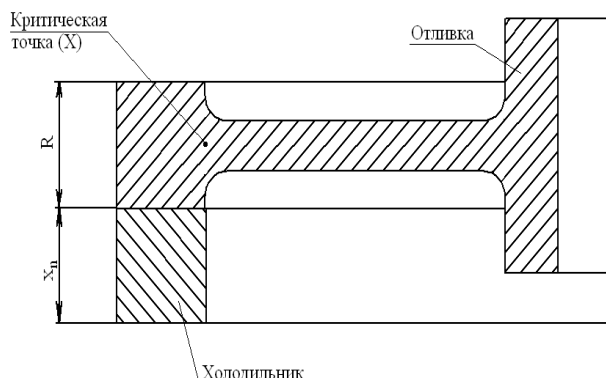


Рис.2 – Схема установки холодильника

лись по ряду теплофизических свойств сплава в САМ ЛП «Полигон» (рис.3).

В результате выбора всех перечисленных выше параметров были определены факторы, изменение которых наиболее существенно оказывает влияние на качество отливки: температура заливки металла и толщина холодильника.

По трехмерной модели была построена конечно-элементная сетка. Усадочные дефекты в отливке рассчитыва-

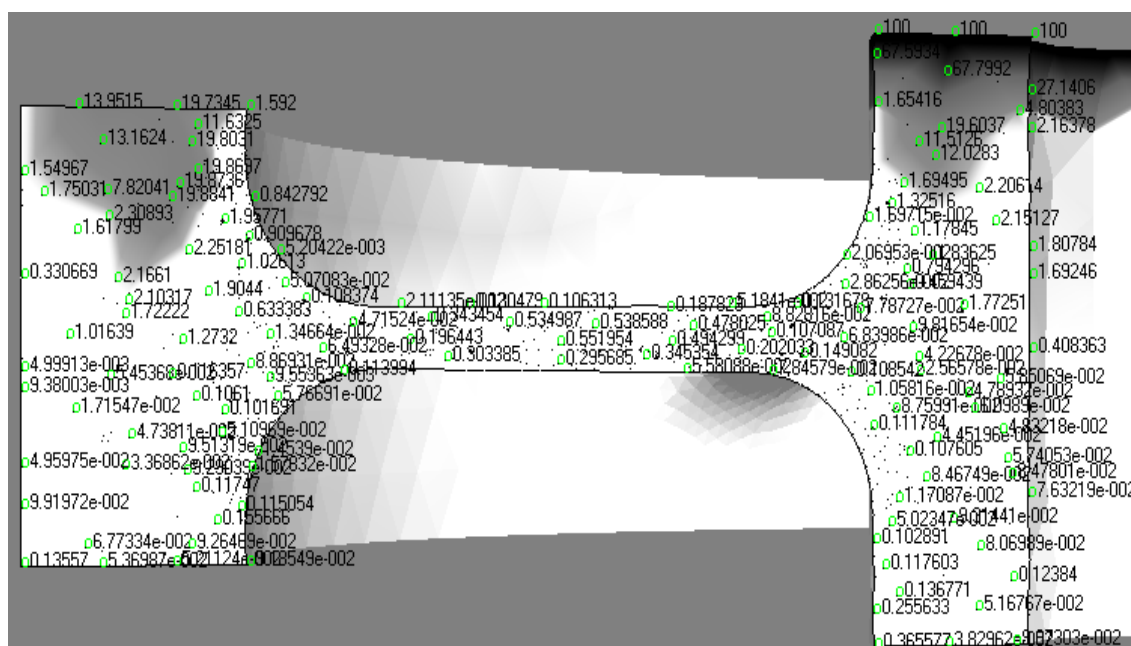


Рис.3 – Количественная оценка усадочных дефектов в вычислительном эксперименте

Вычислительные эксперименты позволили получить значения пористости в критической точке (рис.2) для разных значений температур и толщин холодильника (табл.1, рис.4).

По результатам эксперимента построена регрессионная модель с фиксированной нелинейностью квадратичной зависимости пористости от температуры заливки и толщины холодильника:

$$P = 83,6539 - 2,2848X - 0,1191Y + 0,229X^2 + 0,0013XY + 4,2516e^{-5}Y^2,$$

где  $X$  – толщина холодильника, мм;  $Y$  – температура заливки, °C.

Таблица 1

Зависимость пористости от температуры заливки и толщины холодильника

| Толщина холодильника, мм | Температура заливки серого чугуна, °C |        |        |        |        |        |
|--------------------------|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                          | 1300                                  | 1320   | 1340   | 1360   | 1380   | 1400   |
| 0                        | 0,7942                                | 0,7543 | 0,6735 | 0,3947 | 0,2122 | 0,2959 |
| 0,75                     | 0,4803                                | 0,37   | 0,2579 | 0,18   | 0,196  | 0,2468 |
| 15                       | 0,4544                                | 0,2577 | 0,15   | 0,08   | 0,0343 | 0,09   |
| 22,5                     | 0,3154                                | 0,2205 | 0,1241 | 0,0712 | 0,0621 | 0,0899 |
| 30                       | 0,3379                                | 0,24   | 0,15   | 0,0821 | 0,0647 | 0,079  |
| 37,5                     | 0,3839                                | 0,23   | 0,15   | 0,107  | 0,0687 | 0,079  |
| 45                       | 0,3428                                | 0,2298 | 0,1634 | 0,09   | 0,0687 | 0,0700 |
| 52,5                     | 0,3222                                | 0,1784 | 0,0846 | 0,0667 | 0,0541 | 0,06   |

Такая модель дает погрешность до 30%, что естественно, не удовлетворяет даже самым грубым оценкам усадочных дефектов.

Описать результаты эксперимента какой-либо стандартной функцией с необходимой точностью невозможно. Поэтому необходимо разбиение исходной совокупности значений на более простые группы. Для этого необходимо воспользоваться классификацией объектов по признакам. В решении таких задач очень часто прибегают к кластерному анализу.

В проведенной работе предварительная нормировка факторов осуществлялась в программном статистическом пакете STATISTICA по формуле:

$$z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma},$$

где  $z$  – влияющий фактор (температура заливки, толщина холодильника);  $x$  – исходное значение;  $\bar{x}$  и  $\sigma$  – соответственно среднее и средне квадратичное отклонение. Такое разбиение позволило выявить 4 группы на всем исследуемом пространстве. Остатки  $e_i$ , т.е. отклонение исходного значения исследуемого параметра от линии регрессии для этих групп имеют

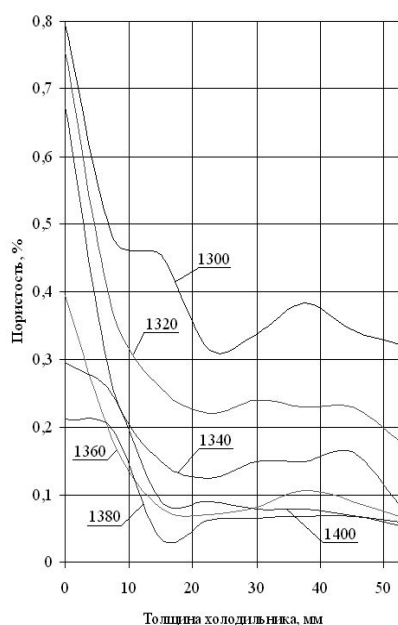


Рис.4 – Зависимость пористости от толщины холодильника и температуры заливки

нормальное распределение. Наличие сериальной корреляции в последовательности остатков  $e_i$  проверялось с помощью критерия Дарбина-Уотсона:

$$d = \sum_{i=2}^n \frac{(e_i - e_{i-1})^2}{Q_e},$$

где  $Q_e$  – остаточная сумма квадратов.

В зависимости от числа факторов (в рассматриваемой задаче их два) и количестве значений факторов (по восемь для каждого фактора) по таблице [3] определяем нижнюю 0,980 и верхнюю 1,54 точки критерия Дарбина-Уотсона. Полученные значения для всех групп приведены в табл.2.

Таблица 2

| Значение критерия Дарбина-Уотсона |          |          |          |
|-----------------------------------|----------|----------|----------|
| 1 группа                          | 2 группа | 3 группа | 4 группа |
| 1,5377                            | 1,43     | 1,1068   | 0,9258   |

Для каждой группы построено разрешающая квадратичная зависимость для двухфакторного эксперимента:

$$\begin{cases} \Pi_1 = 66.24 + 0.237X - 0.096Y - 0.091X^2 - 6e^{-6}XY + 3.458e^{-5}Y^2 \\ \Pi_2 = 228.232 - 4.618X - 0.33Y - 0.39X^2 - 0.0029XY + 0.0001Y^2 \\ \Pi_3 = 111.20 + 2.44X - 0.16Y - 0.268X^2 - 0.0013XY + 6.14e^{-5}Y^2 \\ \Pi_4 = 52.25 + 2.46X - 0.074Y - 1.174X^2 - 0.003XY + 2.654e^{-5}Y^2 \end{cases}$$

Полученная система уравнений позволяет находить решения с допустимой погрешностью менее 5% (для большинства точек значения погрешности не превышает 1%).

Для проверки адекватности вычислительного эксперимента был проведен натурный эксперимент на типовой отливке. Результаты приведены на рис.5 и 6. На рис.5 видна образовавшаяся усадочная раковина в области ступицы, которая так же была получена при вычислительном эксперименте в САМ ЛП «Полигон» (рис.3). Твердость измерялась по центру тела ступицы. По результатам измерений видно уменьшение твердости к верху отливки, то же самое показала численная модель - количественное увеличение дефектов в рассматриваемой отливке. На рис.6 видно уменьшение твердости в вертикальном направлении, что, как и в первом случае соответствует результатам вычислительного эксперимента.

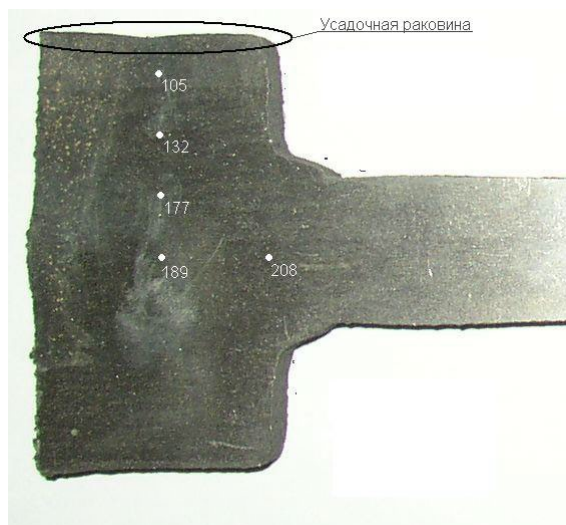


Рис.5 – Зона усадочной раковины и значение твердости (НВ) в ступице отливки

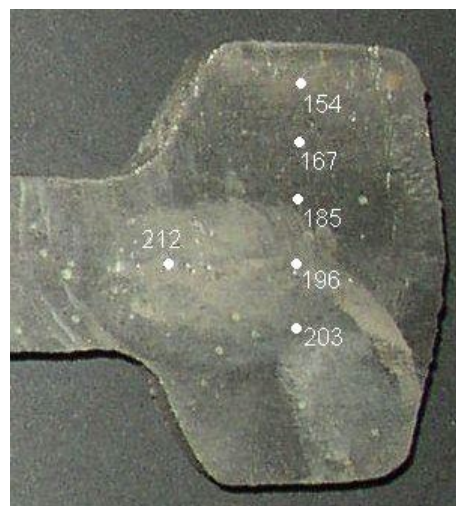


Рис.6 – Значение твердости в ободке отливки (НВ)

В результате вычислительного эксперимента по полученным данным была выбрана модель, описывающая с допустимой точностью процесс формирования пористости в чугунных отливках, получаемых литьем в песчано-глинистые формы. Такая модель позволяет определить значение усадочных дефектов в отливке без специализированных программных средств, сократить время на поиск оптимальных значений температуры заливки и толщин холодильников.

#### Литература

1. Щетинин А.В. Регулирование процесса охлаждения чугунных отливок в форме // А.В. Щетинин, Л.С. Печенкина, Т.И. Сушко // Вестник ВГТУ, Сер. Энергетика. – 2004. – Вып. 7.4. – С. 25 – 31.
2. Справочник по чугунному литью / Под. ред. д-ра техн. наук Н.Г.Гиршовича – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленинград. отд-ние, 1978 – 758 с.
3. Боровиков В. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. 2-е изд. – СПб.: Питер. 2003. – 688 с.: ил.

## **Новые компьютерные технологии и перспективы развития моделирующих систем (2004-2005г).**

*Комаров И. А., (ООО «Фокад», Санкт-Петербург)*

Наверное, всем пользователям хотелось бы иметь у себя в распоряжении самый лучший и самый быстрый компьютер для решения наших задач. Специфика моделирующих расчетов такова, что имеющихся мощностей всегда недостаточно для выполнения моделирования с желаемой степенью адекватности. Более быстрые компьютеры позволяют производить численные эксперименты лучше приближенные к реальности. Попробуем выяснить, какие именно технологические решения предлагаются компьютерной отрасли для создания все более мощных вычислительных машин.

В этом обзоре ограничимся рассмотрением только центральных процессоров (ЦП) новых поколений. Это обусловлено тем, что, во-первых, именно в этой области сейчас происходят весьма интересные изменения и, во-вторых, тем, что при решении задач моделирования именно быстродействие ЦП чаще всего играет решающую роль в общей производительности системы.

Последние несколько лет развитие процессоров происходило в одном направлении. Прежде всего, постоянно увеличивалась тактовая частота процессоров, что обеспечивало увеличение количества выполняемых операций за единицу времени. Кроме того, постепенно менялась архитектура процессоров: добавлялись новые команды, вводились новые регистры. В то же время следует заметить, что принципиально новых изменений не происходило с момента появления на рынке модели Intel 386. Именно начиная с этой модели, процессоры стали поддерживать 32-разрядные вычисления в защищенном режиме; фактически это ознаменовало наступление эпохи 32-разрядных операционных систем (ОС) Windows. Процессоры следующих поколений отличались для конечного пользователя лишь более быстрой работой привычных операционных систем и прикладных программ. Сейчас, однако, все меняется коренным образом.

Ведущие производители процессоров для настольных систем, фирмы Intel и AMD натолкнулись на технологические ограничения, которые делают невозможным ставшее уже привычным для нас наращивание тактовой частоты. Это вынудило их прорабатывать альтернативные варианты повышения производительности систем и к настоящему времени нам предложены две принципиально новые технологии: 64-битные и многоядерные процессоры. Заметим, что для серверных систем 64-битные процессоры стали уже делом привычным, но в сегменте настольных систем они появились только сейчас. Что же стоит за этими названиями, и как они повлияют на моделирование?

Сразу стоит отметить, что имеет смысл в общих чертах разобраться с этими технологиями, хотя бы для того, чтобы аргументировано подходить к выбору нового компьютера. В ближайшее время поставщики компьютерной техники предложат большое разнообразие систем на основе новых процессоров и, выбирая компьютер, надо представлять себе, за что конкретно будут заплачены деньги, и какую пользу та или иная технология, в конечном счете, принесет. Рассмотрим основные критерии выбора.

Уже сейчас можно купить **процессор с поддержкой 64-битных вычислений**. Но не следует думать, что увеличение в два раза разрядности процессора автоматически означает соответствующий прирост производительности. Это не так. Более того, по скорости вычислений 64-битная технология сама по себе не обещает никакого преимущества. Главное преимущество, которое она дает – возможность адресовать практически неограниченное количество оперативной памяти, в отличие от весьма ощутимой для 32-разрядных процессоров границы в 4Гб. Конкретно фирма Intel, например, гарантирует поддержку не менее 64Гб оперативной памяти новыми процессорами. Так что если Ваши задачи требуют при расчете несколько гигабайт памяти – то эта технология для Вас. Если нет – то, вероятно, вложить деньги можно более рациональным образом.

Немного технических подробностей. Новые 64-битные процессоры поддерживают 3 режима работы:

- 32-разрядный режим – режим полной обратной совместимости со «старыми» процессорами. В данном режиме процессор может работать под управлением 32-разрядной операционной системы и прозрачно поддерживает все имеющиеся приложения. Однако под управлением 32-разрядной ОС получить доступ к новым ресурсам процессора невозможно.
- 64-разрядный совместимый режим. Подразумевается, что в этом режиме процессор функционирует под управлением уже 64-разрядной операционной системы, но может выполнять «старые», 32 разрядные программы.
- Полностью 64-разрядный режим. Для работы в этом режиме требуется 64-битная ОС и переработанные соответствующим образом приложения.

Отметим, что для получения доступа к 64-разрядным возможностям нужна 64-разрядная ОС. Кроме поддержки большего количества оперативной памяти в этих процессорах есть еще некоторые усовершенствования. В частности, регистры общего назначения расширены до 64 бит, кроме того, их количество возросло вдвое – до 16. Также до 16 увеличено и количество MMX регистров. Потенциально за счет этого можно получить некоторый прирост производительности, но только при соответствующей поддержке со стороны программного обеспечения. Какое-то время производители

программного обеспечения не смогут предлагать обновленные продукты просто потому, что не будут достаточно распространены компиляторы, умеющие работать с новой регистровой моделью процессоров. Делая общее заключение, можно предположить, что ждать существенного прироста производительности от замены компьютера на 64-разрядный не следует. В лучшем случае он будет составлять 15-20%, о чем свидетельствуют проводимые тесты.

Второе серьезное изменение в стратегии повышения производительности – разработка **многоядерных процессоров**. Системы на основе многоядерных процессоров будут представлять собой практически полный аналог симметричных многопроцессорных систем. Сейчас фирмами Intel и AMD предлагаются двухядерные процессоры, а в перспективе число ядер на процессоре будет увеличиваться – 4, 8 и т.д. Несомненно, с точки зрения повышения быстродействия вычислительных задач это усовершенствование является более полезным, чем поддержка 64-битного адресного пространства. Но, как и в предыдущем случае, само собой быстродействие моделирующих программ не улучшится. Более того, если обеспечить формальную поддержку 64-битных вычислений сравнительно легко, то для использования многоядерности процессора необходимо коренным образом перерабатывать программное обеспечение. Обычное, однопоточное, приложение будет работать на многоядерном процессоре с такой же скоростью, как и на аналогичном одноядерном. И даже формально многопоточное приложение может не давать ожидаемого прироста производительности.

Для того чтобы лучше понять последнее утверждение, следует вспомнить, что зачастую общая производительность системы определяется не быстродействием самого процессора, а производительностью шины данных: в большинстве реальных задач процессор может обрабатывать данные существенно быстрее, чем они поступают на обработку. Таким образом, два процессора, подключенные к общей шине данных (архитектура многоядерных процессоров Intel) не смогут произвести вычисление быстрее, чем один – «узким местом» все равно будет являться оперативная память. На этом фоне сейчас более перспективными выглядят процессоры AMD с отдельным подключением каждого ядра к оперативной памяти. Тем не менее, при грамотном построении алгоритмов, можно свести к минимуму подобные негативные явления.

К чему такие технические подробности? Дело в следующем. Пока проектирование грамотных многопоточных приложений не станет общепринятой нормой, не приходится ждать увеличения производительности вычислений на многоядерных процессорах соответственно количеству ядер на процессоре (а в перспективе, теоретически, можно стремиться именно к этому). Кроме того, декларируемая производителем программно-

го обеспечения поддержка многопоточности на деле может не дать существенного ускорения. Формально такая программа будет являться многопоточной, но из-за несоответствия алгоритмов решения особенностям архитектуры многоядерных процессоров, не сможет рационально использовать их потенциальную вычислительную мощность. Выход тут может быть только один – если Вас всерьез интересует, насколько быстро будут выполняться расчеты на многоядерном процессоре, необходимо протестировать Ваше, конкретное, приложение на таком процессоре. Предсказать заранее, будет ли оправдано использование такого процессора, невозможно. А к заверениям производителей программного обеспечения следует относиться скептически.

Есть еще один момент, о котором стоит упомянуть. У многоядерного процессора всегда неоспоримое преимущество над одноядерным, заключающееся в том, что на нем можно производить несколько расчетов одновременно без потери суммарной производительности системы. Или, как вариант, одновременно с проведением ресурсоемкого расчета, можно использовать компьютер для других целей – готовить данные, просматривать полученные результаты и т.п.

**Выводы.** 64-битная архитектура постепенно будет распространяться на настольные компьютеры, но не следует на нее рассчитывать, как на средство ускорения расчетов. Всерьез она будет полезна лишь в тех случаях, когда для расчета требуется огромное количество оперативной памяти – более 2-4 гигабайт.

Многоядерные процессоры с одной стороны теоретически способны многократно повысить скорость выполнения расчетов, но с другой – это произойдет только в случае грамотной поддержки таких процессоров со стороны программного обеспечения, но никак не само по себе. Выяснить, насколько быстрее конкретная программа будет работать на таком процессоре можно только одним способом – тестированием.

## **Современный подход к изготовлению литейной оснастки.**

*Плакшина А.Е., Денисов Л.Ю. (ООО «Фокад»)*

Ни для кого не секрет, что в настоящее время любое предприятие, пытающееся выжить в рыночных условиях, должно действовать по двум направлениям:

1. Повышать объем реализации своей продукции.
2. Снижать затраты на производство продукции.

Литейное производство здесь не исключение. В силу своей специфики подготовка производства в литье является наиболее длительным процессом. А в условиях мелкосерийного производства, является фактором, значительно влияющим на конечную цену изделия. Наиболее трудоемкая и дорогостоящая часть подготовки производства - это разработка литейной технологии, проектирование и изготовление литейной оснастки.

Кроме того, качество изготовления литейной оснастки определяет часто и качество литья, а значит и его стоимость. Скорость изготовления оснастки является также немаловажным фактором.

В настоящее время в связи с бурным развитием информационных технологий, вычислительной техники и станков с числовым программным управлением (ЧПУ) появилась возможность использовать совсем другие подходы на этапе подготовки производства.

Рассмотрим современный подход этапа разработки литейной технологии, проектированию и изготовлению литейной оснастки.

Основные стадии:

- Построение трёхмерной компьютерной модели отливки
- Согласование чертежа отливки с заказчиком
- Компьютерное проектирование литейной технологии
- Оптимизация литейной технологии с использованием СКМ «ПОЛИГОН»
- Создание 3D моделей элементов литейной оснастки
- Обработка формообразующих поверхностей на станках с ЧПУ по 3D моделям оснастки
- Сборка литейной оснастки

Более подробно наш подход рассмотрим на примере отливки из алюминиевого сплава, получаемой литьем по выплавляемым моделям.

*Построение объемной модели:*

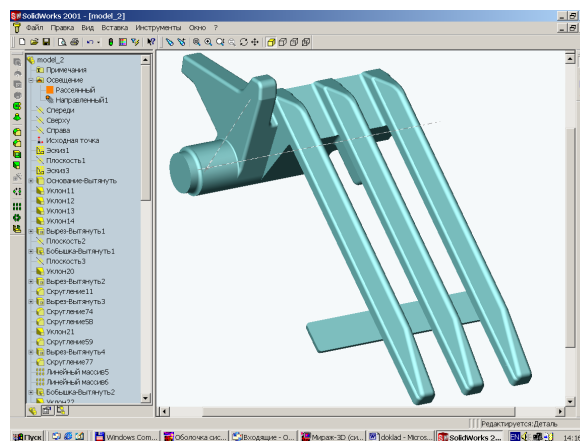
- по чертежу детали, полученному от заказчика, строится 3D модель отливки с учетом технологических элементов (уклонами, припусками, литниками, усадкой и д.т.);
- выпускается чертеж отливки. Чертеж имеет ассоциативные связи с объемной моделью. (Т.е. если изменяется модель, то автоматически изменяет-

ся чертеж, следовательно, сокращаются трудозатраты на выпуск чертежа отливки);

*Согласование чертежа отливки с заказчиком.*

Готовый чертеж отливки отправляется заказчику на согласование. Это важный момент, т.к. приемка заказа будет происходить по согласованному чертежу. В данном проекте при согласовании заказчик потребовал добавить к отливке технологическую перемычку между зубьями для предотвращения коробления восковой модели и отливки (см. рис.1).

Общее время построения объемной модели отливки и всех операций при согласовании составило 5 рабочих дней. Из них 3 дня ушло на согласование чертежей с заказчиком.



*Компьютерное проектирование литейной технологии Рис.1*

На этой стадии, при необходимости, мы можем провести компьютерное моделирование литейной технологии с помощью, представленной в предыдущих статьях, системы ПОЛИГОН. Когда мы уверены в годности технологии, приступаем к проектированию пресс-формы.

После получения конфигурации полуматриц производится их виртуальная сборка, добавляются необходимые крепежные и фиксирующие элементы, толкатели и пр. можно провести проверку на извлекаемость модели. В данном случае (см. рис.2) извлечение модели из пресс-формы, без повреждения модели, не возможно. В связи с этим были внесены некоторые изменения. На рис.3 представлен окончательный вариант.

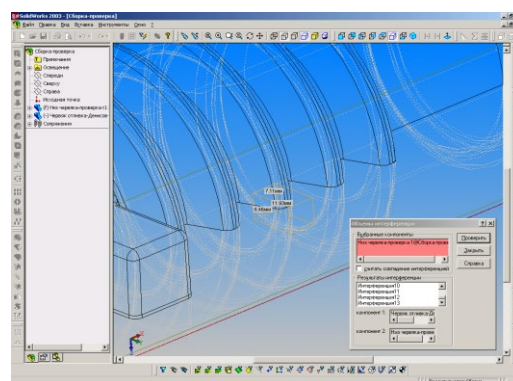


Рис. 2

Полученные модели элементов пресс-формы передаются в систему для генерации управляющих программ обработки для станка с ЧПУ. Затем формообразующие поверхности обрабатываются на 3-х координатном фрезерном станке (станки «Декел» и «Вабеко», Германия).

И в заключение, хотелось бы отметить явные преимущества предлагаемого подхода:

- Сокращение сроков за счёт устранения «бумажной» стадии на этапе проектирования

- Возможность оптимизации литейной технологии на этапе проектирования за счёт применения системы компьютерного анализа
- Сокращение количества элементов оснастки за счёт возможности получения сложнопрофильных поверхностей в одном элементе
- Получение оснастки с высокими точностью и качеством поверхности устраняет трудоёмкую стадию ручной доводки

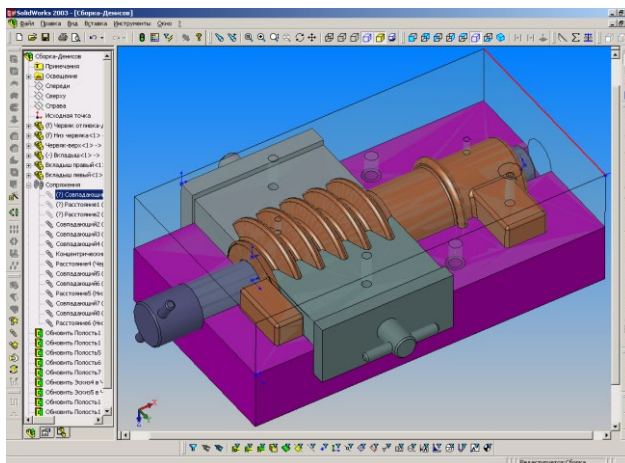


Рис.3

## **Проектирование литниково-питающей системы при литье по выплавленным моделям**

*Ребонен В.Н. (ФГУП ЦНИИМ, Санкт-Петербург)*

Прообразом современных процессов литья по выплавленным моделям (ЛВМ) является метод восковой формовки, по которой лили колокола, детали оружия, украшения и т.п. За прошедшее время метод не только претерпел существенные изменения, но и приобрел промышленное значение и расширился за счет применения различных методов воздействия на формирование формы и отливки, применения большей номенклатуры формовочных материалов и металлов, технологических приемов и т.д.

В настоящее время можно выделить более 70 разновидностей технологического процесса. На каждом отдельном предприятии применяется не более 3...4 разновидностей ЛВМ. Все разновидности объединяют единые представления об изготовлении выплавленной модели, о кинетике заполнения и затвердевания металла, о формировании дефектов а также терминология .

К сожалению, приходится констатировать, что высококвалифицированных технологов-литейщиков становится все меньше из-за непривлекательности работы и низкой зарплаты. Приходящие им на смену не имеют большого опыта в разработке технологии и пользуются скорее интуицией, чем устоявшимися положениями литья по ЛВМ. В связи с этим представляется целесообразным еще раз напомнить об основных принципах разработки технологии ЛВМ, об известных уже методах расчета литниково-питающей системы, дефектах литья и т.п.

Необходимо отметить, что в состав литниково-питающей системы кроме воронки, стояка, литников, питателей, прибылей входят также зумпф, шлаковик, шлакоуловитель, выпор без применения, которых маловероятно получение качественной отливки. К сожалению, в практике разработки технологии ЛВМ эти элементы используются достаточно редко. Кроме того, цеховые технологи применяют только тот вид модельного блока, который использовался в производстве ранее, забывая, например, что наряду с традиционно применяемым стояком могут быть использованы горизонтальные и вертикальные коллекторы в виде балок, радиальных лучей, дисков, колец и т.п. Часто забывается такое теплофизически обоснованное понятие, как «приведенная» толщина стенки отливки или «приведенная» толщина узла, представляющие отношение объема отливки или узла к площади теплоотводящей поверхности. Хотя на этих показателях основаны все расчеты элементов литниково-питающей системы.

При оценке дефектов отливки спай (неслитину) или плену отождествляют с холодной трещиной, утяжину с горячей трещиной, шлаковые раковины – с газоусадочными и т.д. Правильные подходы к разработке

технологии ЛВМ и виды дефектов подробно изложены в общедоступной книге [1], а также в периодической литературе.

В заводской практике наблюдаются случаи, когда приведенная толщина питателя меньше приведенной толщины питаемого узла, что недопустимо. Размеры элементов питающей системы должны быть определены по формулам, приводимым в упомянутой литературе. Во всех случаях толщина питателя должна быть больше толщины теплового узла, а толщина стояка – больше толщины питателя не менее, чем в 1,15 раза (под толщиной элемента понимается приведенная толщина).

Длина питателя должна быть минимальной – 5...15 мм. Если длину питателя увеличивают, то необходимо увеличивать и площадь его сечения, сохраняя приведенную толщину питателя на уровне расчетной.

Объем цилиндрической прибыли ( $V_{пр}$  в см<sup>3</sup>) в первом приближении можно рассчитать по формуле:

$$V_{пр} = 200 R_y + 0,2 V_y;$$

где  $R_y$  – приведенная толщина узла в см;  $V_y$  – объем узла в см<sup>3</sup>.

Высота прибыли принимается в 1,25 – 1,5 раза больше ее диаметра. При литье тонкостенных деталей (стенка менее 5 мм) вопросы питания отходят на второй план. Основным становится заполнение тонких стенок. Необходимая скорость заливки, обеспечивающая заполнение наиболее тонкой стенки составляет:

$$Q = 0,05 \dots 0,08 l/a,$$

где  $Q$  – скорость заливки в кг/см;  $l$  – протяженность стенки в мм;  $a$  – толщина стенки в мм.

Если одновременно заполняются несколько отливок, расположенных на одном уровне, то скорость заливки должна быть во столько же раз выше. Применение зумпфа длиной около 40 мм, позволяет избежать незаполняемость нижнего ряда отливок и избежать попадания в рабочую полость формы первых, наиболее холодных и загрязненных порций металла. Удаление и изоляция инородных включений и шлака достигается применением шлаковика, шлакоуловителя, суженного сечения стояка и фильтров.

При литье пленообразующих сплавов рекомендуют поддерживать скорость подъема металла в форме не менее 40 мм/сек, так как во время заполнения происходит окисление поверхности потока и образование вторичных плен.

Соблюдая перечисленное и другие, указанные в литературе параметры ЛВМ удастся получать отливки с высоким качеством поверхности, высокой плотностью и минимальным браком.

#### Литература

1. «Литье по выплавляемым моделям», под общ. ред. Я.И.Шклянника и В.А.Озерова. Москва. Машиностроение. 1971, 1984г.г.

**Опыт получения литых рабочих колес литьем по выплавляемым моделям с использованием керамических стержней.**  
*Сабиров Д.Х. Денисов Л.Ю. (ООО «Фокад», Санкт-Петербург)*

В конце 2004 года у одного из наших заказчиков возникла необходимость изготовить опытную партию из 5 пар отливок (правых и левых) рабочих колес диаметром 170 мм из нержавеющей стали. В связи с тем, что объем заказа небольшой, крупные предприятия, имеющие опыт изготовления подобных колес, необходимое оборудование и квалифицированный персонал отказались от выполнения заказа. Кроме этого имелась еще одна проблема. Она заключалась в том, что у заказчика не было чертежей собственно лопаток рабочих колеса, а имелись лишь чертежи для механической обработки.

Предварительно заказчик обратился к нам по вопросу проектирования и изготовления оснастки. Во время проведения переговоров мы решили, кроме изготовления пресс-форм, изготовить отливки, используя производственную базу ЦНИИМатериалов. Необходимо отметить что в 80-х годах ЦНИИМ имел все необходимые условия для выполнения такого заказа- оборудование и персонал. Конечно, здесь никогда не изготавливались отливки в промышленных масштабах. Однако такой заказ ЦНИИМ выполнил бы без труда. Однако за прошедшие 15 лет ситуация в корне поменялась. Имеющиеся специалисты ушли, новых не прибавилось, большая часть оборудования пришла в негодность. Нам предстояло в части изготовления литья провести большую организаторскую работу: собрать различных специалистов и оборудование в единое целое, пускай даже и временно. Задача осложнялась тем, что время на выполнение всего заказа было отпущено 3 месяца. Однако в связи с тем что эта работа лежала в русле дальнейшего развития предприятия, а мы хотим в дальнейшем у себя еще и изготавливать отливки, мы решили взяться за нее.

Изготавливать отливки решили методом литья по выплавляемым моделям. Внутренние полости лопаток решили оформлять керамическими стержнями, изготовленными низкотемпературной формовкой. Соответственно, для этого необходимо было изготовить 2 пресс-формы (правую и левую) и два стержневых ящика.

Первый шаг, как и для любой пресс-формы это построение объемной модели отливки и согласование чертежа отливок. В данном случае это задача осложнилась тем, что у нас отсутствовали оцифрованные чертежи профиля лопаток, а имелись лишь линии их проекций. Однако, используя оцифрованные линии проекций, удалось восстановить геометрию лопаток. Геометрическое моделирование проводилось в CAD системе Solidworks. Объемная модель представлена на рис.1.

Следующий этап – проектирование пресс-формы и стержневого ящика. Используя полости отливки, были получена объемная модель формообразующих частей стержня. Затем к ней были добавлены знаковые части, и была получена объемная модель стержня (рис.2). Сделав сборку стержней и отливки, мы получаем полость пресс-формы и вычитанием получаем полуматрицы (рис.3).

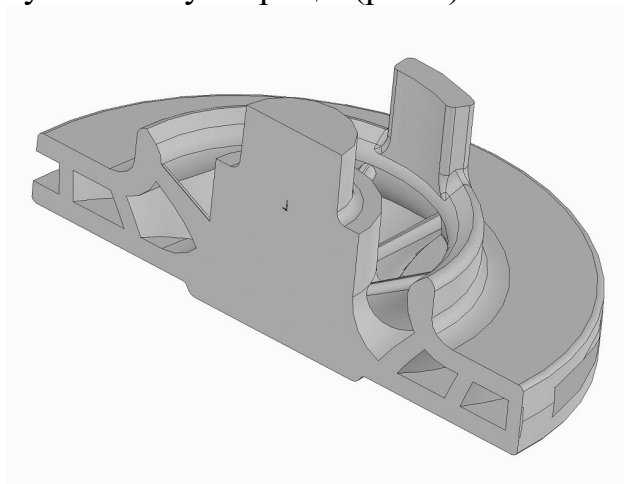


Рис1. Объемная модель отливки «Рабочее колесо». (Половина модели отсечена)



Рис. 2. Объемная модель стержня для отливки «Рабочее колесо».

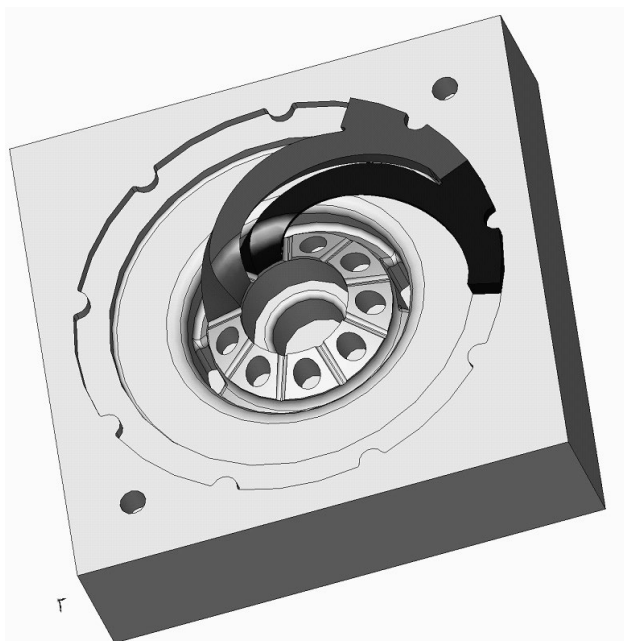


Рис. 3. Объемная модель сборки полуматрицы со стержнями.

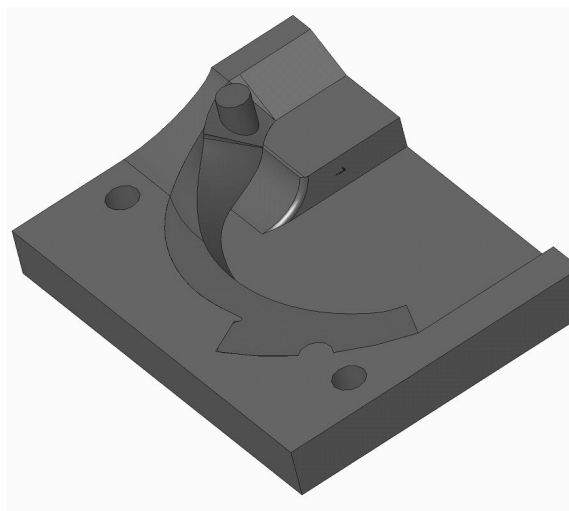


Рис. 4. Объемная модель половины стержневого ящика со стержнем.

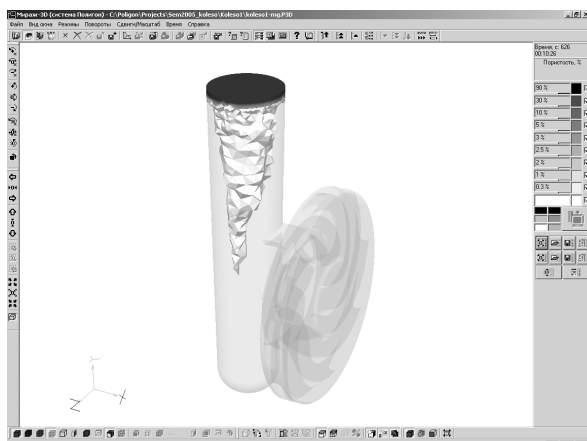


Рис. 5. Зоны с пористостью выше 1% для отливки с вертикальным расположением.

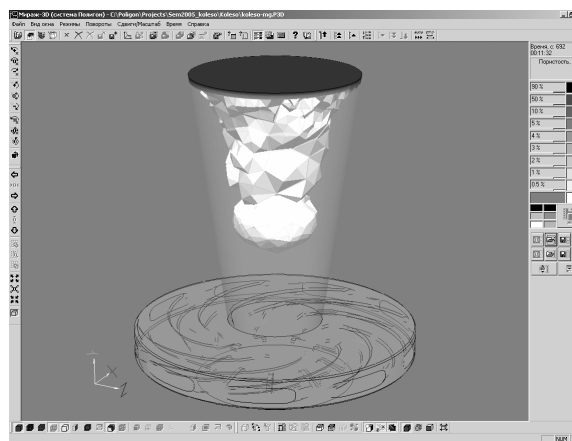


Рис. 6. Зоны с пористостью выше 1% для отливки с горизонтальным расположением

Затем надо было спроектировать стержневой ящик, имея объемную модель стержня. Технология здесь аналогична. Ситуация немного осложнилась тем что линия разреза стержневого ящика не лежит в плоскости. Однако это не помешало в результате получить полость стержневого ящика, а затем две половинки его (рис.4).

Параллельно с проектированием оснастки шло моделирование литейных процессов для подбора оптимальной литейной технологии. Предлагалось принципиально две схемы: с горизонтальным расположением колеса с заливкой через прибыль и вертикальным расположением с заливкой через стояк с тремя питателями. Результаты моделирования по разным технологиям показаны на рис. 5 и 6. Т.к. отливка достаточно равностенная, а прибыль в обоих вариантах достаточно массивная, проблем с питанием отливок не должно было возникнуть. Это и показали результаты компьютерного моделирования.

Основные трудности, как и предполагалось, начались на этапе изготовления отливки. Планировалось все изготавливать по традиционной технологии. Заготовки стержней прокаливались 2 часа при температуре 850°C, при котором они приобретали необходимую прочность. Затем собиралась пресс-форма со стержнями и запрессовывался модельный состав. Затем получали корочку из плавленого кварца, прокаливали ее при температуре 900°C. Затем корочку заформовывали в опоку, прогревали до 750-800°C и заливали расплав при температуре 1600°C. Основные моменты изготовления моделей показаны на рис.7.

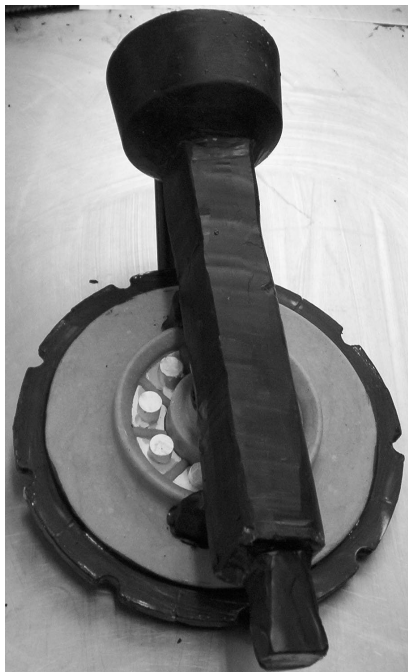


Рис. 7. Собранный куст по вертикальной технологии



Рис. 8. Брак корочки

Первые проблемы появились на этапе изготовления стержней. Выяснилось, что температура спекания  $850^{\circ}\text{C}$  недостаточна для обеспечения необходимой прочности для таких условий запрессовки. Ввиду того, что стержень имеет в некоторых местах относительно тонкое сечение, модельный состав при запрессовке ломает некоторые из них. Самое неприятное, что это не видно сразу после запрессовки. Снаружи все выглядит замечательно, а брак выявляется только после заливки и выбивки отливок. Для устранения этих дефектов пришлось не запрессовывать модель, а использовать свободную заливку. Это привело к дополнительным трудозатратам при изготовлении куста, но в целом проблему решило.

Имелись также трудности при изготовлении корочки. Выяснилось, что существуют места в районе знаковых частей, которые плохо обсыпаясь во время изготовления корочек. Это приводило к характерным дефектам, показанным на Рис.8. Для устранения дефектов пришлось уделять дополнительное внимание этим местам.

Кроме того, имелись определенные проблемы с выбивкой стержней. Обычная технология выщелачивания в кипящей щелочи была мало результативна, т.к. щелочь слабо поступает в глубины стержня. Приходилось предварительно, высверливать стержни насколько позволяла геометрия, а затем выщелачивать.

В целом все проблемы удалось решить и сдать отливки в срок.

## Проектирование литейной технологии в САД-системах при подготовке студентов-литейщиков

*Ердаков И.Н., канд. техн. наук, доцент.*

*(Южно-уральский государственный университет, г. Челябинск)*

В связи с усложнением профессиональной деятельности происходит изменение и процесса обучения будущих специалистов. В ВУЗах вводится новая двухуровневая модель обучения: бакалавр → инженер или магистр. В этой связи претерпевают изменения и учебные планы, в том числе и по курсу систем автоматизированного проектирования (САПР). Для каждой ступени образования курс САПР следует рассматривать как двухуровневую модель, где на каждом уровне ставится задача – сформировать у студентов соответствующие навыки и умения (рис.1).



Рис.1—Модель двухуровневого обучения по курсу САПР

На первом уровне бакалавра у студентов должны сформироваться навыки самостоятельной разработки электронной чертежной документации. На втором уровне инженера или магистра предполагается сформировать навыки создания электронных чертежей при помощи компьютерных трехмерных тел проектируемых деталей, которые предварительно подвергаются инженерным расчетам на ЭВМ. Полученные навыки также дополняются умениями автоматизированного проектирования литейной модельной оснастки.

Вузовское обучение включает теоретический курс и практику на предприятиях, соответствующего профиля. Как правило, студенты проходят основные виды практик на одних и тех же предприятиях. Поэтому материалы практики и приобретаемые знания во время обучения должны позволить студентам дифференцировано и методично совершенствовать

реальный технологический процесс, с которым они ознакомились на производстве.

Первый этап совершенствования базовой заводской технологии изготовления детали осуществляется в квалификационной работе бакалавра. Второй и третий этап на уровне инженера (магистра). Во время преддипломного проектирования появляется возможность корректировки студенческого проекта и качественного усовершенствования (модернизации) базового технологического процесса. Многоуровневая схема совершенствования и качественного улучшения студентами реальных технологий во время обучения представлена на рис.2.

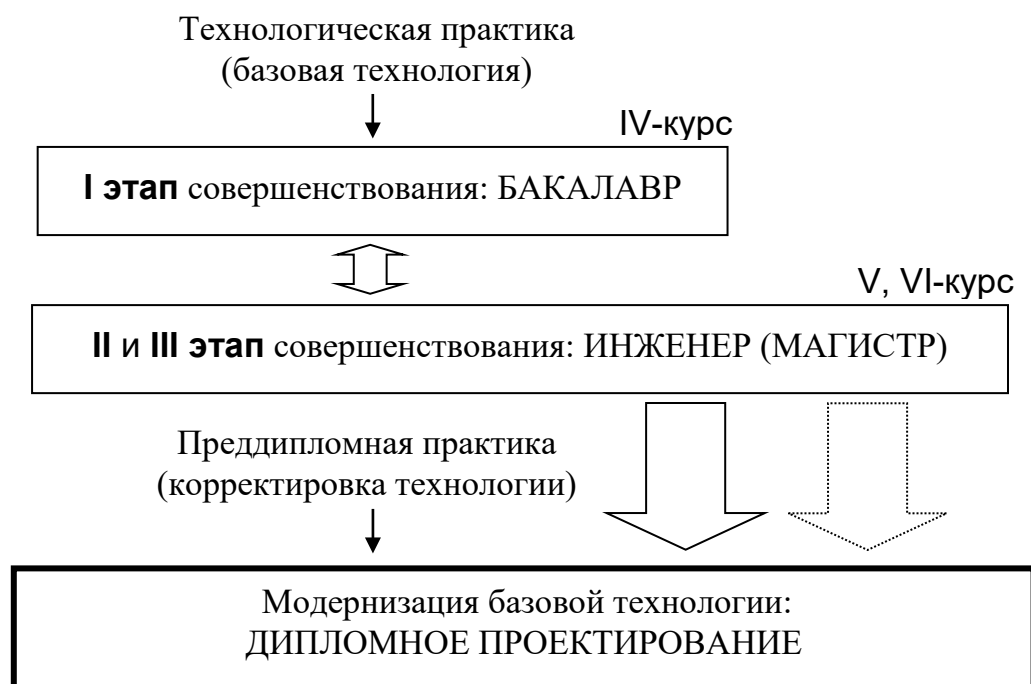


Рис.2—Многоуровневая схема совершенствования и модернизации студентами реальных технологий в процессе обучения

Результатом объединения указанных выше схем является сквозная модель использования САД-систем в учебном процессе подготовки студентов, например, по специальности «Литейное производство черных и цветных металлов» в Южно-уральском государственном университете (ЮУрГУ) (рис.3).

На первом уровне студенты в курсе компьютерной графики или компьютерного проектирования литых деталей создают электронный аналог (заготовку) чертежа отливки с элементами литейной формы. Индивидуальную технологическую документацию и чертежи реальной отливки студенты берут во время производственной практики на соответствующую

щих предприятиях. Разработка чертежа ведется в системе T-FLEX CAD 2D с модулем «ОТЛИВКА».

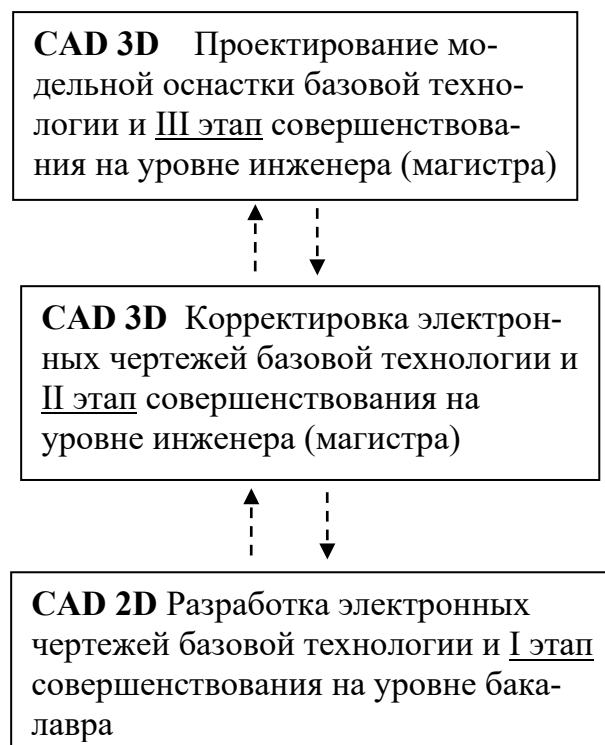


Рис.3—Сквозная модель использования CAD-систем в учебном процессе

На лекционных занятиях по САПР рассматриваются основные понятия и принципы проектирования литейной технологии. Изучаются правила графического обозначения чертежа отливки по ГОСТ 3212–92, а также методы построения электронных чертежей, к которым относятся метод, представляющий собой аналогию черчения на бумаге, и метод, использующий элементы построения, где строится каркас чертежа с последующим нанесением на него линий изображения.

На практических занятиях при помощи модуля «ОТЛИВКА» уточняется класс точности отливки, элементы литой детали, назначаются припуски на механическую обработку, формовочные и технологические уклоны. После чего средствами T-FLEX CAD 2D наносится литейная технология на электронный чертеж в соответствии с требованиями ГОСТ 3212–92.

Полученный электронный вариант чертежа заводской литейной технологии, навыки работы в CAD-системе T-FLEX 2D позволяют студентам в дальнейшем самостоятельно и быстро оформить чертежную документацию для выпускной квалификационной работы бакалавра. Пример чертежа отливки «Цилиндр колесный» с элементами литейной формы, разработанный студентом в T-FLEX CAD 2D представлен на рис.4.

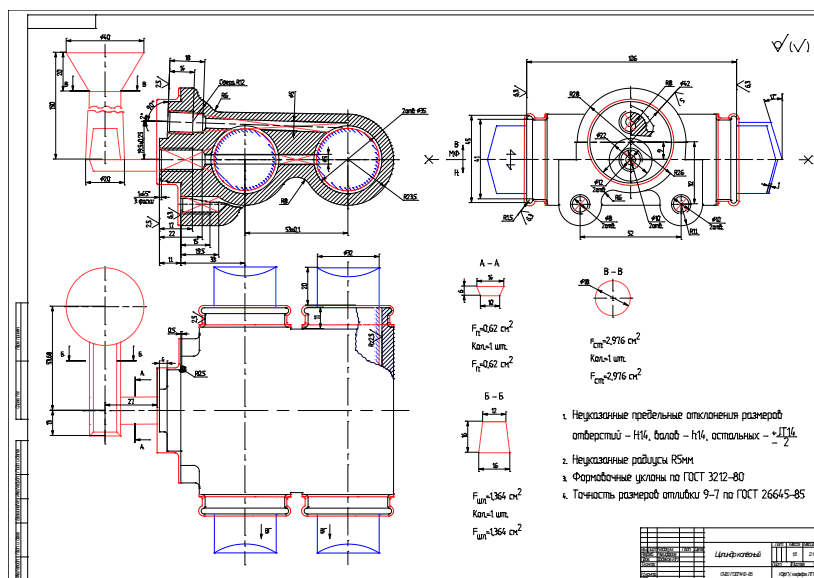


Рис.4—Чертеж отливки «Цилиндр колесный» и элементов литейной формы, разработанный студентом в T-FLEX CAD 2D

На втором уровне обучения САПР в курсе «Компьютерные технологии в литейном производстве» предусмотрено твердотельное трехмерное проектирование отливки и литейной формы в таких CAD-системах, как КОМПАС 3D и T-FLEX 3D. За время обучения студенты получают представления о трехмерных CAD-системах, знакомятся с твердотельным моделированием, методами построения сборок и формируют навыки построения 3D тел.

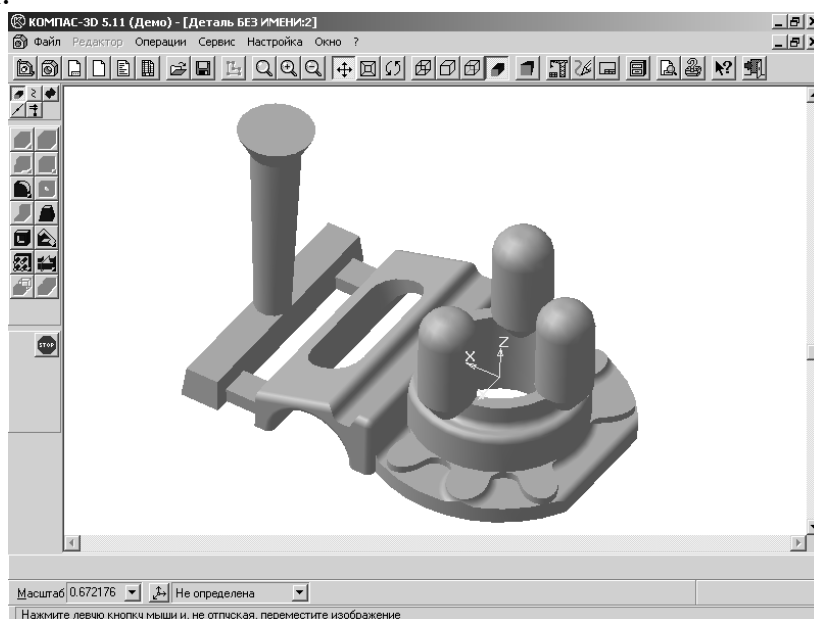


Рис.5—Отливка «Крышка» с элементами литейной формы, выполненная студентом в CAD-системе КОМПАС 3D

Заданием на проектирование является электронный чертеж технологии изготовления отливки выпускной работы бакалавра. При этом отливка с элементами литейной формы может строиться как одно 3D тело или представлять собой 3D сборку отдельно построенных деталей: отливки, литниковой системы, прибыли и выпоров. В последнем случае, появляется возможность создать базу данных указанных элементов и ускорить процесс проектирования типовых литейных форм. Отливка «Крышка» с элементами литейной формы, выполненная студентом в САД-системе КОМПАС 3D показана на рис.5.

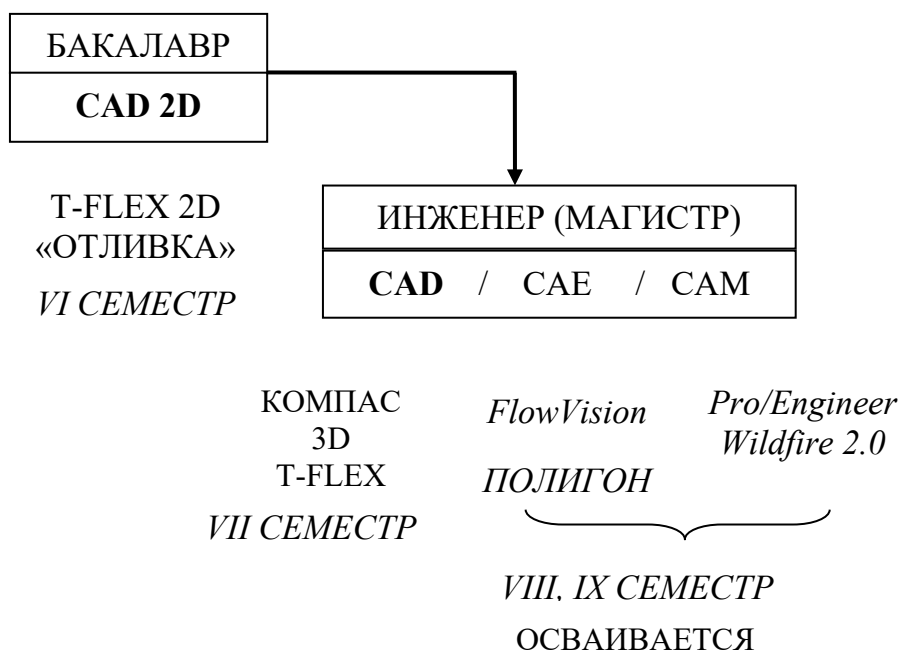


Рис.6—Сквозная модель проектирования  
чертежной документации в САД-системах при подготовке  
студентов-литейщиков ЮУрГУ

После построения трехмерной отливки и формы осуществляется инженерный компьютерный анализ технологии ее изготовления, проектируется литейная оснастка. Лекционный материал посвящен теоретическим подходам моделирования литейных процессов: понятию вычислительного эксперимента, методу конечных разностей, методу конечных элементов и методу граничных объемов, а на практике студенты осваивают САПР «FlowVision» и «ПОЛИГОН». Прделанные вычислительные исследования и знания специальных предметов обеспечивают дальнейшее совершенствование (II-этап) технологии изготовления индивидуальной отливки и соответствующие изменения в электронной чертежной документации. Проектирование литейной модельной оснастки ведется в автоматизиро-

ванной системе Pro/Engineer *Wildfire* (III-этап модернизации базовой технологии).

Предложенная сквозная модель проектирования чертежной документации в САД-системах при подготовке студентов-литейщиков успешно реализуется на физико-металлургическом факультете ЮУрГУ на кафедре литейного производства (рис.6).

На данный момент заканчивается освоение систем компьютерного моделирования литейных процессов: заполнение литейных форм «FlowVision» и затвердевание отливок «ПОЛИГОН», а также русифицированной версии САПР Pro/Engineer *Wildfire 2.0*.

Подводя итог, отметим, что предложенная сквозная схема использования САД-систем в учебном процессе позволяет динамично и наглядно проектировать реальный технологический процесс изготовления отливки за время обучения в ВУЗе, а будущим выпускникам быстро и самостоятельно адаптироваться на предприятиях, применяющих САПР.