

На правах рукописи

Коротченко Андрей Юрьевич

РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ПОЛУЧЕНИЯ  
ФАСОННЫХ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК В ПЕСЧАНЫХ ФОРМАХ  
БЕЗ УСАДОЧНЫХ ДЕФЕКТОВ И ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН

Специальность 05.16.04 – Литейное производство

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва, 2014 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана» Министерства образования и науки Российской Федерации

**Научный консультант**

доктор технических наук, профессор.  
«МАТИ - Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского»

Смыков Андрей Федорович

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор.  
Президент Российской ассоциации литейщиков

Дибров Иван Андреевич

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой.

«Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)»

Ершов Михаил Юрьевич

доктор технических наук, профессор.  
«Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А.Соловьева»

Изотов Владимир Анатольевич

**Ведущая организация:**

ГНЦ РФ ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»  
г. Москва

Защита состоится 18 декабря 2014 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 212.110.05 при «МАТИ - Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская д.3, ауд. 523А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке «МАТИ - Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского»

Автореферат разослан «    » сентября 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Палтиевич А.Р.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Развитие литейного производства невозможно без современных методов проектирования технологических процессов, которые неразрывно связаны с активным применением вычислительной техники. При разработке новых технологических решений необходимо сознавать, что эффективными являются только те технологии, которые позволяют получать нужную конфигурацию фасонных литых изделий с требуемыми служебными свойствами при минимальных затратах энергии и времени.

Как известно, улучшение качества отливок, т. е. получение отливок с заданными служебными свойствами - фундаментальная научно-техническая проблема литейного производства. Главным направлением в ее разработке является создание и применение новых технических и технологических решений, обеспечивающих формирование служебных свойств отливок в конкретных условиях литейной технологии, а это в свою очередь невозможно без систем компьютерного проектирования и моделирования.

В настоящее время имеется достаточно мощный математический аппарат, описывающий основные процессы при формировании свойств отливок, и на его базе созданы комплексы пакетов прикладных программ, позволяющих в сжатые сроки моделировать разные литейные процессы и оптимизировать значения параметров, влияющих на служебные свойства отливок. Одной из важных научных задач продолжает оставаться исследование и формализованное описание взаимосвязи между многофакторными процессами, влияющими на качество отливок, и последующего применения новых полученных знаний для развития теории литейных процессов и совершенствования существующего программного обеспечения.

Литейные технологии принято описывать структурной моделью, представляющей собой граф, вершинами которого являются укрупненные этапы изготовления отливки, а ребра или дуги графа характеризуют последовательность выполнения этих этапов. Профессор Баландин Г.Ф. указывал, что есть четыре основных этапа технологии изготовления отливки, которые вносят свою долю «ответственности» за качество отливок. Это приготовление расплава, изготовление формы, заполнение расплавом формы, затвердевание расплава и последующее охлаждение отливки.

В настоящей работе рассматриваются два этапа: изготовление формы и затвердевание расплава. Из всего многообразия операций и процессов, происходящих на этих этапах, выбраны: уплотнение сырых песчано-глинистых смесей – на первом этапе; питание отливок и горячие трещины – на втором этапе.

Столь разнохарактерные по своей природе процессы, как будет показано далее в работе, можно рассматривать с общих позиций и разрабатывать для них новые технические и технологические решения, обеспечивающие требуемое качество литья.

Работа выполнена на кафедре литейных технологий в ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана в соответствии с планами научно-технических и хозяйственных работ с различными отечественными предприятиями и организациями, а также в соответствии с 3 грантами.

Цель работы: развитие теории, исследование способов достижения качества фасонных отливок и разработка совокупности технических и технологических решений, обеспечивающих получение отливок с заданными служебными свойствами.

Для достижения цели работы поставлены следующие основные задачи:

- разработать научно-обоснованные методики изучения напряженно-деформированного состояния сырых песчано-глинистых смесей (СПГС) под действием статических и динамических нагрузок, выбор вида реологической модели;

- разработать методики определения значений параметров реологической модели СПГС;

- сформулировать математические модели (ММ), описывающие уплотнение СПГС под действием статических и динамических нагрузок и содержащие параметры реологических моделей, связанные с переменной плотностью смесей;

- сформулировать ММ, описывающие рабочий процесс формовочных машин и включающие процессы впуска и выхлопа сжатого воздуха из камер машин, вязкоупругого соударения твердых тел, воздействия импульса сжатого газа на СПГС;

- на основе теорий кристаллизации сплавов, теплопроводности и литейной гидравлики разработать критериальные оценки образования усадочной пористости в отливках и зоны питания прибылей; определить критические значения полученных критериев с учетом условий литья.

- установить взаимосвязь между напряженно-деформированным состоянием в двухфазной зоне затвердевающей отливки и образования усадочной пористости; провести экспериментальную оценку влияния затрудненной усадки на образование пористости в литых заготовках; разработать рекомендации по устранению горячих трещин в отливках;

- разработать методики расчетов получения отливок без усадочных дефектов и горячих трещин для условий с малой интенсивностью их охлаждения при затвердевании;

- сформулировать общую реологическую модель, позволяющую на стадиях формирования формы и затвердевания отливки прогнозировать служебные свойства литой заготовки.

Методы исследования: теоретические исследования процесса уплотнения СПГС под действием различных внешних нагрузок и теплового взаимодействия отливки и формы выполнены на основе методов механики

сплошной среды, гидродинамики и теплообмена, включающих аналитические и численные методы решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния СПГС выполнены с использованием специальных лабораторных стендов и регистрирующей аппаратуры. Для проведения расчетов, и обработки результатов натуральных и компьютерных экспериментов, использована вычислительная техника.

Научная новизна:

1. Сформулирована обобщенная математическая модель уплотнения СПГС под воздействием встряхивания, прессования, импульса сжатого воздуха и их комбинаций, которая позволяет учесть изменение свойств смеси при нагружении и переходные процессы в исполнительных органах формовочных машин; определены значения параметров этой модели, связанные с плотностью смеси.

2. Предложено новое дифференциальное уравнение уплотнения смеси, учитывающее вид напряженно-деформированного состояния смеси в форме, реологические свойства смеси и величину внешней нагрузки, с использованием которого подтверждено влияние бокового перетекания смеси при уплотнении на характер нарастания плотности смеси в форме и затраты энергии на уплотнение смеси.

3. Экспериментально установлена и расчетами подтверждена определяющая роль бокового перетекания смеси на распределения плотности смеси в форме. Разработана методика управления распределением плотности смеси и минимизации затрат энергии при уплотнении, путем устранения бокового перетекания смеси при уплотнении.

4. Предложены критерии для оценки образования пористости в отливке в условиях:

- нестационарного теплообмена с учетом длины двухфазной зоны и времени затвердевания;

- малой интенсивности теплообмена отливки с формой в виде параметрической связи с приведенным размером; экспериментально определены предельные значения критерия для стального литья.

5. Разработана методика, основанная на применении параметрического критерия, для расчета на ранних стадиях проектирования необходимого количества дополнительных элементов питания отливок, которые предотвращают образование горячих трещин в отливках.

6. Разработана методика определения критических значений новых критериев, обеспечивающая непрерывность фильтрационного питания фасонных отливок.

7. Разработана единая упруго-вязкопластическая реологическая модель для расчета уплотнения СПГС в опоке, теплообмена затвердевающей отливки с формой и ее напряженно-деформированного состояния при затрудненной усадке.

8. Разработан обобщенный параметрический критерий оценки вероятности образования бездефектных зон в песчаной форме и затвердевающей отливке, основанный на отношении протяженности бездефектной области к ее приведенному размеру.

9. Разработана методология проектирования технологического процесса изготовления фасонных литых заготовок в песчаных формах с заданными служебными свойствами на основе предложенной единой реологической модели и новых критериальных зависимостей.

Основные положения, которые выносятся на защиту:

- математические модели уплотнения СПГС при статических и динамических способах нагружения;
- методика определения значений параметров, входящих в реологическую модель СПГС;
- режимы уплотнения СПГС, обеспечивающие заданное качество песчаных форм;
- критерии для оценки образования усадочной пористости в отливках и длины зоны питания прибылей;
- методики экспериментальной оценки критических значений разработанных критериев для конкретных условий литья и марок сплавов;
- методика расчета образования пористости в отливке, основанная на переменном значении критерия длины двухфазной зоны и времени затвердевания;
- выявленные зависимости между деформациями растяжения и усадочными процессами в отливках и методика для расчета необходимого количества дополнительных элементов питания отливок, которые предотвращают образование горячих трещин в отливках.

Практическая значимость:

- разработан новый способ изготовления разовых литейных форм из сырых песчано-глинистых смесей и оснастка для его осуществления;
- разработан пакет программ для расчета уплотнения СПГС на формовочных машинах;
- разработан критерий для определения длины зоны питания прибылей, с помощью которого можно на начальных этапах разработки техпроцесса (не прибегая к компьютерному моделированию) рассчитывать необходимое количество прибылей;
- разработана методология совместного использования новых критериальных решений и систем моделирования литейных процессов с целью получения требуемых служебных свойств отливок и эффективности технологической подготовки процессов гравитационными методами литья;
- разработанные программы и методики расчета уплотнения смеси на встряхивающих и пресово-встряхивающих формовочных машинах опро-

бованы в конструкторском бюро АО «НИИлитмаш», г. Москва и в вычислительном центре «Уралвагонзавода», г. Н. Тагил;

Результаты работы в виде математических моделей, методик расчета уплотнения СПГС и пористости в отливках и методических указаний к практическим занятиям используются в учебном процессе на кафедре «Литейные технологии» ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана в ряде курсов лекций, а также курсовом и дипломном проектировании.

Личный вклад автора состоит: в научно-теоретическом обосновании, постановке и решении задач для достижения цели работы, а также в анализе и обобщении экспериментальных данных; в разработке комплекса математических моделей и компьютерных программ для моделирования уплотнения СПГС на формовочных машинах.

#### Апробация работы

Материалы работы были представлены на следующих конференциях и семинарах: аукционе "Новые технологические процессы литейного производства и оборудование для них», Каширский литейный завод «Центролит». Кашира, 1987; Республиканской научно-технической конференции «Автоматизация, роботизация и применение ЭВМ в литейном производстве». Минск, 1988; семинаре «Опыт использования ПЭВМ в литейном производстве». МДНТП. Москва, 1991; семинаре научно-методического совета по специальности 120300 «Машины и технология литейного производства». Красноярск, 1991; Всероссийской научно-технической конференции «Машиностроительные технологии». Москва, 1998; Всероссийской научно-технической конференции «Машиностроительные технологии». Москва, 2008 г.; научно-практических семинарах «Актуальные проблемы развития литейного производства». Москва, 2008, 2012, 2013; 52nd International Scientific Conference «Solidification and Crystallization of Metals 2011». Polish. Katowice, 2011; 3-я международная конференция и выставка «Алюминий 21/Литье». Санкт-Петербург, 2012; научных семинарах кафедры литейных технологий МГТУ имени Н.Э. Баумана. Москва, 1995-2011; XI съезде литейщиков. Екатеринбург, 2013.

#### Публикации

По материалам диссертации опубликована 31 научная работа, из них 21 статья из Перечня научных изданий ВАК РФ, 3 авторских свидетельства и 2 патента.

#### Структура и объем работы

Работа состоит из введения, семи глав, общих выводов и списка литературы из 212 наименований, изложена на 305 страницах машинописного текста, содержит 112 рисунков и 11 таблиц. Общий объем работы 305 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность и сформулирована цель работы, изложены научная новизна, практическая значимость и результаты, выносимые на защиту.

### **1. Анализ комплексности технологических решений по совершенствованию способов уплотнения смеси и устранения усадочных дефектов и горячих трещин в отливках**

Анализ литературы показал, что литейная форма, изготовленная путем уплотнения СПГС, оказывает существенное влияние на формирование служебных свойств отливки.

Действительно, управляя податливостью песчаной формы (путем изменения степени ее уплотнения), мы можем управлять как величиной, так и распределением напряжений, возникающих в отливке, тем самым, предотвращая возможность возникновения горячих трещин в отливке.

Управляя степенью уплотнения песчаной формы, мы управляем, с другой стороны, тремя основными теплофизическими характеристиками формы, которые определяют характер затвердевания отливки в форме. Эти параметры – плотность, теплопроводность и удельная теплоемкость формы. Следовательно, имея в руках набор знаний и умений по управлению распределением плотности смеси по объему формы, мы получаем возможность более эффективно влиять на усадочные процессы и напряженно-деформированное состояние отливки в процессе ее затвердевания в литейной форме.

Второй объединительной чертой столь разнохарактерных процессов является то, что для их изучения предлагается использовать единый критерийный подход, который позволяет применить знания, полученные при изучении поведения смеси при уплотнении, к изучению особенностей формирования усадочной пористости и горячих трещин в отливках.

И, наконец, третья объединительная черта – процессы уплотнения смеси в форме, усадка отливки и горячие трещины рассматриваются с единой позиции как сложные системы, для изучения которых предлагается использовать, в том числе, и положения системотехники.

1. Анализ методик расчета уплотнения смеси в форме показал, что все существующие методики расчета можно условно разбить на три группы. К первой группе относятся методы расчета, в которых используются эмпирические зависимости между величиной плотности смеси и величиной внешней нагрузки. Ко второй группе можно отнести методики, в которых даны рекомендации по величине внешней нагрузке и характеру ее приложения, обеспечивающие заданное качество уплотнения. Методики третьей группы – математические модели, описывающие уплотнение смеси под действием внешних нагрузок.



Н.П. Аксенов предложил для оценки качества формы эмпирическое уравнение «идеальной» кривой уплотнения. В уравнении идеальной кривой плотность смеси  $\rho$  зависит от гидростатического давления металла, действующего на стенки формы при заливке. Согласно этому уравнению,  $\rho$  должна быть максимальна на ладе формы, и нелинейно убывать к контрладу.

Используя понятие «идеальной» кривой уплотнения и производственный опыт изготовления форм со сложными по конфигурации моделями, можно сформулировать два критерия качества формы:

- распределение плотности смеси по высоте формы определяется величиной гидростатического давления расплавленного металла, действующего на стенки формы при заливке;
- плотность смеси в горизонтальных сечениях формы должна быть равномерной и равной технологически заданной.

2. Анализ реологических моделей формовочной смеси. Для моделирования поведения смеси при уплотнении применяются самые различные способы. В последнее время при моделировании все больше и больше используются приемы и методы, развитые в механике сплошной среды, а именно в реологии. В литейном производстве впервые поведение смеси при уплотнении с позиций реологии было рассмотрено в работах Г.Ф. Баландина и В.И. Семенова. Реологический подход для описания поведения смеси при уплотнении оказался плодотворным и целый ряд исследователей предложил свои реологические модели. Здесь можно упомянуть, прежде всего, работы Г.М. Орлова и И.В. Матвеевко. Подводя итог, можно отметить, что:

- построение реологической модели – наиболее эффективный путь для установления связи между напряжениями и деформациями (плотностью) в смеси во время ее уплотнения;
- выводы о рациональных способах нагружения и необходимых свойствах смеси носят отрывочный характер. Единый подход к управлению качеством форм отсутствует;

3. Анализ усадочных дефектов в отливках показал, что согласно Б.Б. Гуляеву, усадочные дефекты можно разделить на усадочные раковины и усадочную пористость.

Согласно Г.Ф. Баландину, для уменьшения пористости отливок и предохранения их от ликвационных дефектов больше других нас должен интересовать лишь один процесс – питание отливки и наиболее распространенные технические средства его реализации на производстве – прибыли. Методик расчета размеров прибылей довольно много и Б.Б. Гуляев разделил эти методики на три группы:

- методики, в основе которых лежат обобщенные производственные данные: М.А. Кремер, А.А. Рыжиков, С.В. Руссиян, П.Ф. Василевский и др.;

- методики, построенные на основе аналитических расчетов: Б.Б. Гуляев, Й. Пржибыл и др.;

- методики, основанные на экспериментальных исследованиях: И.К. Ипатов, Б.В. Рабинович и др.

К смешанному типу методик можно отнести методику расчета прибыли А.С. Чеботарева и Ю.М. Чикунова.

Несмотря на внешние различия и подходы при разработке методик расчета прибылей, можно выделить главные общие черты:

- необходимо определить коэффициент прибыли в виде  $K = V_{np} / V_o$  или  $K = R_{np} / R_o$ , где  $V_{np}$  и  $V_o$  объемы прибыли и отливки, а  $R_{np}$  и  $R_o$  - приведенные размеры прибыли и отливки;

- задать геометрические соотношения между диаметром прибыли  $D_{np}$  и высотой прибыли  $H_{np}$ .

- найти численные значения  $D_{np}$  и  $H_{np}$ .

Все существующие методики расчета прибылей, как показал анализ, требуют проведения большого количества экспериментов для определения значений эмпирических параметров, входящих в эти методики.

4. Изучение оценок возникновения усадочной пористости в отливках показало, что можно выделить два направления:

- разработка моделей возникновения и развития усадочной пористости в отливках;

- разработка критериев образования усадочной пористости в отливках.

В данной работе рассматриваются только критерии образования усадочной пористости (далее КП). Анализ показал, что в настоящее время получили широкое распространение КП, предложенные Ниямой, а также Ли и Сюри. Так, критерий Нияма имеет вид  $G / \sqrt{S}$ , где  $G$  - температурный градиент;  $S$  - скорость охлаждения. В остальных критериях используются такие характеристики расплава, как  $V_s$  - скорость затвердевания;  $f_L$  или  $f_s$  - доля жидкой и твердой фаз соответственно;  $\Delta P$  - перепад давления;  $I$  - длина капилляра;  $t_s$  - локальное время затвердевания;  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости;  $L$  - длина двухфазной зоны;  $D_0$  - диаметр равноосных кристаллов;  $\beta$  - коэффициент объемной усадки при затвердевании. Следует отметить, что все критерии пористости строятся на параметрах, подлежащих определению при численном моделировании процесса затвердевания отливки в форме.

Анализ комплексности технологических решений по совершенствованию способов уплотнения смеси, и устранения усадочных дефектов и горячих трещин в отливках показал отсутствие единой научно-

обоснованной базы, на основе которой можно разрабатывать новые, высокоэффективные способы повышения качества отливок.

## 2. Исследование условий формообразования при получении фасонных отливок в песчаных формах

На основании работ в области динамических испытаний грунтов, напряженное состояние смеси при уплотнении на формовочных машинах можно рассматривать в большинстве случаев как трехосное сжатие без возможности бокового расширения. Особенно это относится к случаю уплотнения смеси в узких зазорах между стенками моделей и между стенками моделей и опоки. Следовательно, эксперименты должны воспроизводить именно этот режим нагружения. Еще одной важной особенностью процесса уплотнения смеси на формовочных машинах, которую необходимо учитывать в эксперименте, является то, что при объемном сжатии смеси имеется свободный выход содержащегося в ней воздуха.

Эксперименты проводились в институте механики МГУ им. Ломоносова на установке, которая использовалась для изучения напряженно-деформированного состояния грунтов при различных скоростях нагружения. В эксперименте использовалась формовочная смесь с влажностью 3,1 – 3,2%.

Типичные результаты экспериментов при динамическом нагружении смеси показаны на Рис. 1

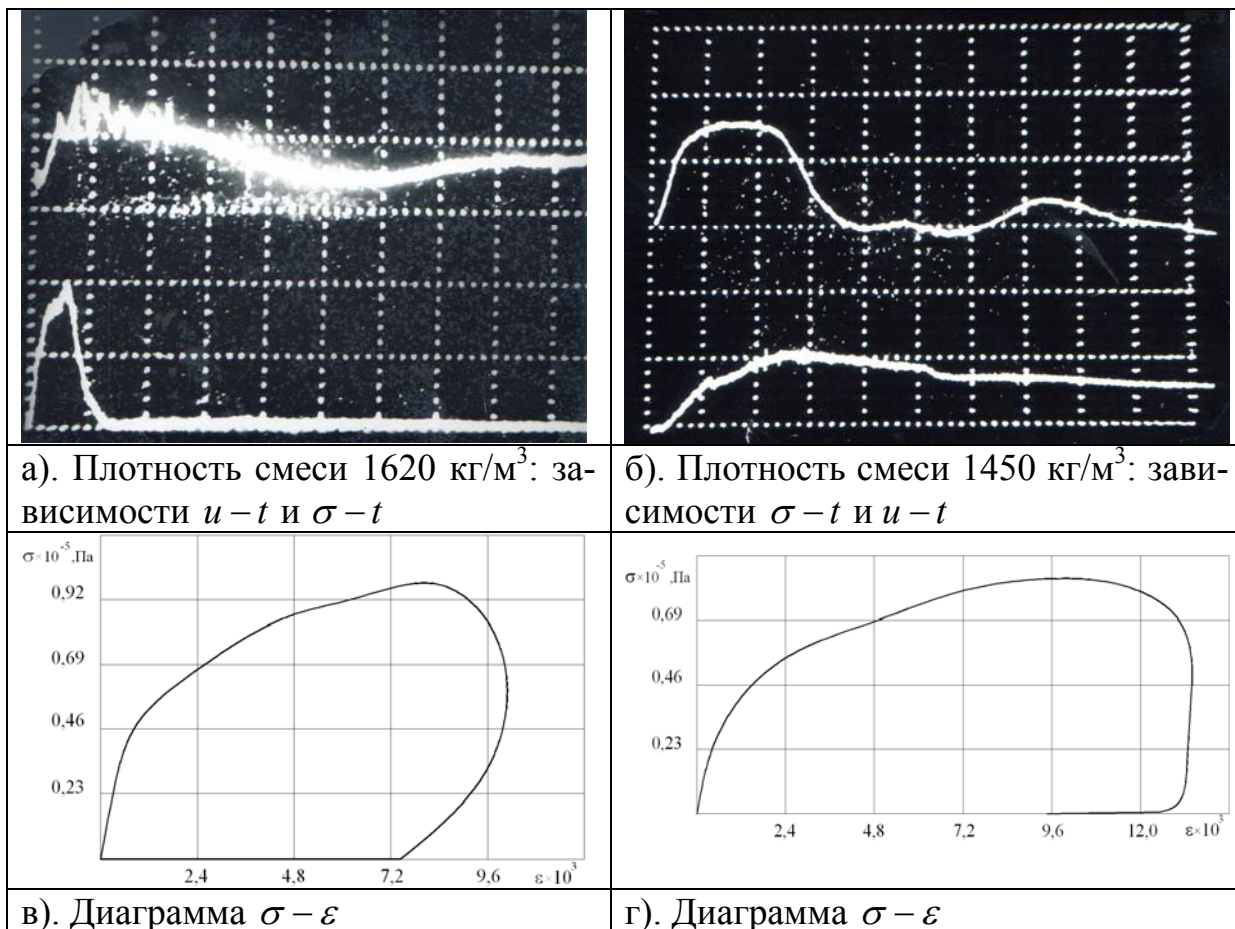


Рис.1. Результаты экспериментов

На Рис.1 а) верхняя кривая соответствует перемещению смеси  $u$  во время удара, а нижняя кривая – изменению во время удара напряжений в смеси  $\sigma$ . На Рис. 1 б) кривые расположены наоборот: верхняя кривая соответствует изменению напряжений  $\sigma$ , а нижняя – перемещению смеси  $u$ .

На Рис.1 в) и 1 г) показаны диаграммы «напряжения – деформации» ( $\sigma - \varepsilon$ ), построенные по данным Рис.1 а) и 1 б) соответственно. Величина деформации  $\varepsilon$  определялась как  $\varepsilon = u / l_0$ , где  $l_0$  - начальная высота образца смеси.

Как следует из кривых на Рис.1 а) деформирование смеси может протекать без остаточных деформаций, и со значительными остаточными деформациями, Рис.1 б). Таким образом, реологическую модель можно представить в виде:

$$M = \Phi_1 - \Phi_2, \quad (1)$$

где  $M$  - реологическая модель;  $\Phi_1$  - часть реологической модели, описывающая связь между  $\sigma$  и  $\varepsilon$  в упруговязкой области;  $\Phi_2$  - часть реологической модели, отражающая связь между  $\sigma$  и  $\varepsilon$  в пластической области деформирования. Знак «-» в уравнении (1) означает последовательное соединение частей реологической модели.

Из данных, представленных на Рис.1 а) следует, что максимум деформаций наступает с запаздыванием по отношению к максимуму напряжений, то же относится и моменту прихода в нуль  $\sigma$  и  $\varepsilon$ . Описать такое поведение можно с помощью реологической модели Кельвина, состоящей из параллельно соединенных элементов  $H_1$  и  $N_1$ :

$$\Phi_1 = H_1 | N_1, \quad (2)$$

где  $H_1$  - упругий элемент Гука;  $N_1$  - вязкий элемент Ньютона. Знак «|» означает параллельное соединение элементов.

Однако эта модель не даст качественного совпадения с данными Рис.2, г) если задать начальную скорость деформации. Действительно, модель (2) дает связь между  $\sigma$  и  $\varepsilon$  в виде:

$$\sigma = E_1 \varepsilon + \eta_1 \dot{\varepsilon}, \quad (3)$$

где  $E_1$  - модуль упругости 1 рода;  $\eta_1$  - коэффициент вязкости;  $\dot{\varepsilon}$  - скорость деформации.

Тогда при  $\dot{\varepsilon} \neq 0$  и  $t = 0$  будем иметь значения  $\sigma$  отличные от нуля, что противоречит данным на Рис.1. Чтобы устранить это несоответствие, необходимо вместо модели Кельвина применить стандартную линейную модель Ишлинского, которая имеет вид:

$$\Phi_1 = H_1 - (H_2 | N_1). \quad (4)$$

М. Рейнер отмечал, что следует учитывать различия между двумя коэффициентами вязкости, из которых один связан с упругими деформациями объема, а второй – с пластическим течением. На наличие вязкости при пластическом течении указывается и в ряде других работ. В работах В.

Прагера и Ф.Г. Ходжа говорится, что в модели должны быть элементы  $N_2$  и  $S$ , соединенные параллельно:

$$\Phi_2 = N_2 | S,$$

где  $S$  - пластический элемент Сен-Венана.

Еще одним основанием для параллельного соединения  $N_2$  и  $S$  является то, что пластическое течение происходит под действием любой нагрузки, величина которой превышает предел пластичности.

Итак, реологическую модель смеси можно записать в виде:

$$M = H_1 - (H_2 | N_1) - (N_2 | S). \quad (5)$$

На Рис.2 представлена механическая модель смеси, соответствующая уравнению (5).

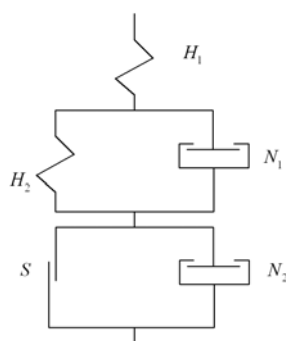


Рис.2. Механическая модель смеси

Согласно Рис.2 поведение реологической модели смеси при нагружении определяется значениями пяти параметров: двух модулей упругости  $E_1$  и  $E_2$ , двух коэффициентов вязкости  $\eta_1$  и  $\eta_2$ , и предела пластичности  $\sigma^*$ . Для определения их значений была разработана специальная методика, с помощью которой были получены зависимости значений этих параметров от плотности смеси.

Таким образом, на основании проведенных экспериментов, в работе для случая трехосного напряженного состояния была получена пятиэлементная реологическая модель смеси. Данная модель состоит из двух частей, одна из которых описывает связь между напряжениями и деформациями в упруговязкой области деформирования смеси, а другая – в пластической области. С помощью специальной методики были определены значения параметров этой модели, связанные с плотностью смеси.

### 3. Разработка технических и технологических решений, повышающих качество уплотнения сырых песчано-глинистых форм

Для расчета распределения плотности смеси по объему формы была разработана обобщенная математическая модель уплотнения смеси под действием внешних нагрузок.

Обобщенная математическая модель уплотнения смеси состоит из системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих напряженно-деформированное состояние смеси и краевых (начальных и граничных) условий. Граничные условия определяются рабочим

процессом формовочных машин (перемещение встряхивающего стола, движение прессовой головки, распространение сжатого воздуха и т.п.). В связи с этим в обобщенную математическую модель уплотнения смеси входят еще и математические модели, которые описывают рабочий процесс формовочных машин.

На основании системы уравнений была разработана двумерная модель уплотнения смеси и пакет программ, позволяющий рассчитать уплотнение смеси. Граничные условия в этой модели определяются разработанными моделями рабочих процессов формовочных машин. На Рис.3 показано распределение плотности смеси при встряхивании.

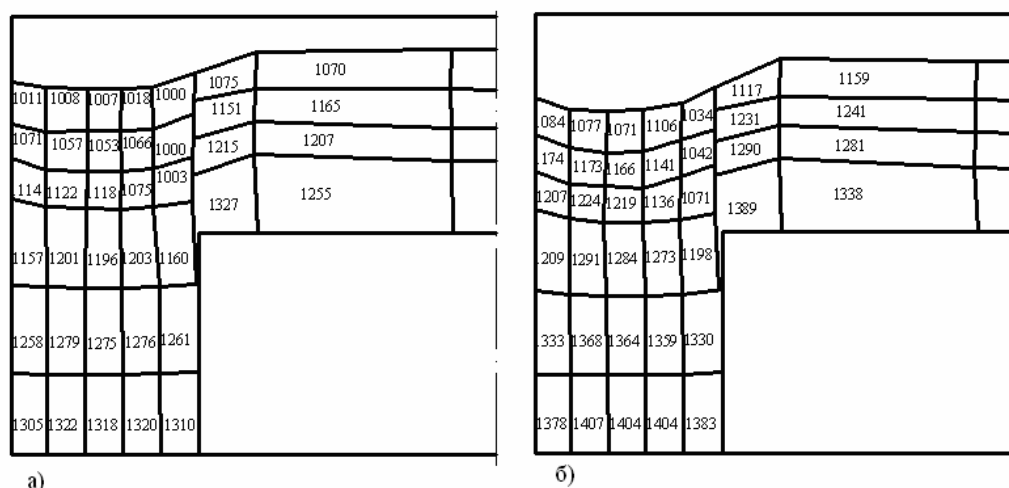


Рис.3. Распределение плотности смеси: а) после 5 ударов, б) после 10 ударов

Сравнивая Рис.3а) и 3б) видно, как возрастает плотность в каждой ячейке. Вместе с тем хорошо видна неоднородность плотности смеси в ячейках, расположенных над и около угла модели. Плотность смеси в ячейке, расположенной у верхнего угла, самая низкая из всех близлежащих. Объясняется это значительным боковым перетеканием смеси из над-модельной области в околomodельную, что хорошо видно на Рис.3,б), где показано искажение вертикальной границы ячейки около верхнего угла модели. Там где нет значительного перетекания, плотность смеси в соседних горизонтальных ячейках изменяется незначительно. Отклонение потока смеси от вертикальной стенки модели приводит к недоуплотнению смеси около верхнего угла модели.

Двух и трехмерные математические модели уплотнения смеси позволяют получить распределение плотности смеси в форме и дать оценку качества будущей отливки. Так, например, выявленные в расчетах зоны недоуплотнения, или наоборот, переуплотнения, неизбежно приведут в дальнейшем к браку в отливках по засорам, короблению, трещинам, а в ряде случаев, и пористости в отливках.

С другой стороны, если мы хотим изучить особенности поведения смеси при различных способах уплотнения, когда нас больше интересует

качественная сторона процесса, тогда становятся оправданными пути на дальнейшее упрощение модели уплотнения смеси, которые позволяют получить новые знания об исследуемом объекте с минимальными временными затратами на вычисления. Один из таких путей – использование в расчетах одномерной модели уплотнения смеси.

При одномерной постановке задачи уплотнения смеси имеем четыре неизвестные величины: напряжения  $\sigma_x$ , деформации  $\varepsilon_x$ , перемещения  $u$  и плотность смеси  $\rho$ . Все остальные компоненты тензоров напряжений и деформаций, а также компоненты вектора перемещений вдоль осей  $Y$  и  $Z$  равны нулю.

Для уплотнения смеси импульсом сжатого воздуха была разработана одномерная математическая модель, отличающаяся от существующих моделей использованием уравнения Навье – Стокса. Данное уравнение позволяет учесть в расчетах перепад давления газа между клапаном импульсной головки и свободной поверхностью формы и его влияние на уплотнение смеси.

Вариантные расчеты с использованием одномерной модели уплотнения смеси показали, что основная причина неравномерного уплотнения смеси связана с перетеканием смеси из надмодельных в околomodельные области формы. Данный вывод был подтвержден и в серии натуральных экспериментов, в которых использовалась высокопрочная формовочная смесь с влажностью 3,1 – 3,2%.

Для повышения качества уплотнения высокопрочных формовочных смесей с низким содержанием влаги были сформулированы требования к операциям уплотнения:

- смесь должна уплотняться в форме отдельными, изолированными друг от друга областями (без перетекания в горизонтальных сечениях формы). Правило разбиения смеси на отдельные области следующее: в каждой области должны отсутствовать резкие перепады высоты и площади горизонтальных проекций различных частей отливки.

Следуя данному требованию, сложная форма разделяется на ряд простых, подобных форме без моделей, качество уплотнения которых можно обеспечить без особых затруднений. Выполнение этого требования обеспечивает изготовление формы заданного качества с минимальными энергозатратами.

Рассматривая различные виды напряженного состояния смеси при уплотнении, было получено дифференциальное уравнение уплотнения смеси вида:

$$\dot{\rho} = \rho \cdot \frac{\sigma - \sigma^*}{\eta} n, \quad (6)$$

где  $n$  - коэффициент, значение которого равно  $\left(1 - \frac{2\lambda^2}{1-\lambda}\right)$  для трехосного напряженного состояния (ТНС) без возможности бокового расширения и равно  $(1-2\lambda)$  для случая одноосного напряженного состояния (ОНС);  $\eta$  - коэффициент пластической вязкости;  $\lambda$  - коэффициент скорости поперечной деформации. Значение  $\sigma$  может быть как постоянным, так и переменным во времени.

Расчеты уплотнения смеси с использованием (6) показали, что в зависимости от вида напряженного состояния смеси длительность нарастания плотности смеси существенно различается (при одной и той же величине внешней нагрузки). Минимальное время на уплотнение имеет место при  $n = 1$ , увеличивается при ТНС без возможности бокового расширения и существенно больше при ОНС. Данный результат имеет значение при наложении ограничения на время действия внешней нагрузки. Следовательно, для того, чтобы получить одинаковую плотность за одно и тоже время, при ОНС нужно затратить больше энергии, чем при  $n = 1$  и ТНС без возможности бокового расширения.

Особый интерес представляет случай, когда значение  $n = 1$ . Это значение возможно при  $\eta(\mu) = 0$  и обеспечивает минимальные затраты энергии на уплотнение смеси.

Результаты расчетов, представленных в работе, позволили предложить несколько способов снижения затрат энергии при уплотнении высокопрочных формовочных смесей с низким содержанием влаги:

- динамическое приложение внешней нагрузки (при этом снижается значение коэффициента скорости поперечной деформации вследствие явления тиксотропии);

- ограничение бокового перетекания смеси при уплотнении.

Вычислительное моделирование, аналитические расчеты и натурные эксперименты явились основой для разработки системы требований, которым должны отвечать способы уплотнения смеси:

Первое требование, которое должно быть обеспечено любым способом изготовления форм – это независимость действия внешних нагрузок, приложенных к различным областям формы, друг от друга.

Второе требование – динамическое приложение внешней нагрузки.

Третье требование – простота и надежность оборудования, соблюдение санитарных норм.

Четвертое требование – управление действием внешней нагрузки на различные области формы.

#### **4. Разработка технических и технологических решений, обеспечивающих получение отливок с заданным уровнем усадочных дефектов**



Для определения зон в отливках с усадочными дефектами, в настоящее время используются различные критерии образования пористости в отливках, среди которых наиболее широкое применение в вычислительном моделировании нашел критерий пористости (КП) Ниямы:

$$G / S^{1/2}, \quad (7)$$

где  $G = dT / dx$  - температурный градиент;  $S = dT / dt$  - скорость охлаждения. Чем меньше значение критерия, тем выше вероятность образования усадочной пористости в отливках. Для стальных отливок усадочная пористость образуется при значении критерия меньше  $755 [^{\circ}\text{C}^{1/2}\text{c}^{1/2}\text{м}^{-1}]$ . Вывод КП Ниямы основан на решении фильтрационной задачи, основа которой – уравнение Дарси.

Пути устранения пористости, согласно решению фильтрационной задачи, сводятся к уменьшению потерь давления при фильтрации расплава через двухфазную зону с одной стороны и увеличению давления, действующего на расплав, с другой стороны.

Решение фильтрационной задачи, на основе которой был получен КП Ниямы и ряд других имеет вид:

$$P_1 - P_0 = \frac{\mu\beta V_s}{\alpha} L, \quad (8)$$

где  $P_1$  и  $P_0$  - давление в жидкой и двухфазной зоне соответственно;  $\alpha$  - коэффициент, равный  $\alpha = K / f_L$ , где  $K$  - коэффициент проницаемости двухфазной зоны, а  $f_L$  - относительное количество жидкой фазы;  $\beta$  - относительная объемная усадка;  $V_s$  - скорость затвердевания;  $L$  - ширина двухфазной зоны.

Если в уравнении (8) записать  $V_s$  в виде  $V_s = L / t_3$ , тогда уравнение примет вид:

$$P_0 = P_1 - \left( \frac{\mu\beta}{\alpha} \right) \frac{L^2}{t_3}, \quad (9)$$

где  $t_3$  - время затвердевания двухфазной зоны.

Сомножитель  $L^2 / t_3$  можно записать в форме нового критерия для оценки образования пористости в отливках:

$$K_1 = L / \sqrt{t_3}, \quad (10)$$

Критическое значение  $K_1$ , при котором образуется пористость в отливке, определяется или из серии специальных экспериментов, или используется связь с уже известными величинами. Так, была получена связь критерия  $K_1$  с КП Ниямы  $K_N$ :

$$K_1 = \frac{\sqrt{\Delta T}}{K_N}, \quad (11)$$

где  $\Delta T$  - температурный интервал затвердевания.

Для случаев литья, когда можно использовать модель малой интенсивности охлаждения (пренебречь перепадом температуры по сечению отливки),  $t_3$  можно записать в виде:

$$t_3 = R_0^2 / m^2, \quad (12)$$

$$\text{где } m = \frac{1,13b_\phi(T_S - T_\phi)}{c_{\text{эф}}\rho_2(T_L - T_S)} = \text{const}; R_0 - \text{приведенный размер отливки.}$$

Значение  $m$  записано для расплавов типа твердых растворов, без учета влияния перегрева.

В константу  $m$  входят:  $c_{\text{эф}}$  - эффективная удельная теплоемкость;  $\rho_2$  - плотность расплава в двухфазной зоне;  $b_\phi$  - коэффициент тепловой аккумуляции формы;  $T_\phi$  - начальная температура формы;  $T_L$  и  $T_S$  - температуры ликвидуса и солидуса соответственно.

Если подставить время затвердевания из уравнения (12) в (9), то:

$$P_0 = P_1 - \left( \frac{\mu\beta m^2}{\alpha} \right) \frac{L^2}{R_0^2}, \quad (13)$$

и критерий для оценки образования пористости можно записать в виде:

$$K_2 = \frac{L}{R_0}. \quad (14)$$

Критерии  $K_1$  и  $K_2$  связаны между собой соотношением:

$$K_1 = mK_2, \quad (15)$$

Критические значения критериев  $K_{1kr}$  и  $K_{2kr}$ , соответствующие началу образования пористости в отливках, определяются или с использованием уже существующих экспериментальных данных, или с помощью специально разработанных для этого методик. В частности, предложены методы экспериментальной оценки критических значений разработанных критериев для конкретных условий литья и марок сплавов.

Полученные критические значения КП  $K_{1kr}$  и  $K_{2kr}$ , имеют смысл в рамках модельных допущений о стационарности двухфазной зоны и не учитывают целый набор факторов, имеющих место в реальных условиях литья и влияющих на фильтрационное течение расплава.

Из всего многообразия факторов, влияющих на фильтрационное течение расплава, в работе рассмотрены массовые силы и газонасыщенность расплава и показано, что эти факторы в значительной степени изменяют критические значения КП  $K_{1kr}$  и  $K_{2kr}$ .

Так, значение  $K_{1kr}$  при допущении о стационарности двухфазной зоны имеет вид  $K_{1kr} = \sqrt{\Delta P / A}$ , где  $\Delta P$  - критические потери давления в

двухфазной области, при которых образуются газоусадочные поры,  $\Delta P = P_L - P_S$ ;  $A = \mu\beta / \alpha$  - константа.

Если междендритный канал располагается под наклоном, то фильтративное течение расплава вдоль срединной оси будет описываться уравнением вида:

$$uf_L = -\frac{K}{\mu} \left( \frac{dP}{dx} + \rho_L g \sin(\varphi) \right), \quad (16)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения;  $\varphi$  - угол наклона канала.

Решение уравнения (16) дает выражение для критического значения КП, с учетом действия силы тяжести  $K_{1kr}^g$ :

$$K_{1kr}^g = \sqrt{\frac{\Delta P + \frac{B}{G} \sin(\varphi)}{A}}, \quad (17)$$

где  $B = \Delta T \rho_L g$  - постоянная величина.

Здесь следует заметить, что  $K_{1kr}^g$  зависит не только от критического перепада давления, но и от температурного градиента. Поэтому для расчета  $K_{1kr}^g$  при известном критическом перепаде давления нужно учитывать значение слагаемого члена  $\frac{B}{G} \sin(\varphi)$ .

Из формулы (17) следует, что в случае  $\sin(\varphi) < 0$  (питание снизу-вверх) существует критический температурный градиент  $G_{kr}$ , вблизи которого критическое значение КП  $K_{1kr}^g$  стремится к нулю. В другом крайнем случае, когда  $G \rightarrow \infty$ , т.е. при стремлении ширины двухфазной зоны к нулю, критическое число КП  $K_{1kr}^g$  стремится к значению «классического» критического числа  $K_{1kr}$ .

Соотношение (17), в частности, показывает, что при питании сверху - вниз,  $\sin(\varphi) > 0$ , действие силы тяжести на фильтрацию расплава приводит к плавному увеличению критического значения КП  $K_{1kr}^g$  при уменьшении градиента температуры в двухфазной зоне (что означает уменьшение вероятности образования пористости). Но при питании снизу-вверх,  $\sin(\varphi) < 0$ , при уменьшении градиента температуры критическое значение КП  $K_{1kr}^g$  стремится к нулю (пористость будет всегда).

Таким образом, анализ действия силы тяжести на фильтрацию в двухфазной зоне отливки показывает, что «классическое» критическое число КП  $K_{1kr}$  не полностью отражает условия образования микропористости. При учете силы тяжести, критический перепад давления, при котором образуются газоусадочные поры, зависит еще от абсолютного значения градиента температуры и от ориентации фронта затвердевания по отноше-

нию к силе тяжести. Соответственно, критическое число КП  $K_{1kr}$  также должно зависеть от этих факторов. Неучет данного явления может привести к существенным ошибкам в прогнозе образования пористости.

Критический перепад давления в двухфазной зоне с учетом атмосферного и металлостатического давления равен:

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{r_{min}} + P_a + \rho_l gh - P_g, \text{ где } \sigma, P_g - \text{поверхностное натяжение и}$$

давление газа в пузырьке соответственно;  $P_a$  - атмосферное давление,  $h$  - металлостатический напор;  $r_{min}$  - радиус минимального устойчивого газового пузырька и уравнение (17) можно записать в виде:

$$K_{1kr}^g = \sqrt{\frac{\frac{2\sigma}{r_{min}} + P_a(1-\gamma) + \rho_l gh + \frac{B}{G} \sin(\varphi)}{A}}, \quad (18)$$

где  $\gamma = \theta_N^2 \frac{[N]_{kr}^2}{K_N^2} + \theta_H^2 \frac{[H]_{kr}^2}{K_H^2}$  - это относительное давление газа в пу-

зырьке;  $[H]_{kr}, [N]_{kr}$  - граничная (предельная) растворимость водорода и азота в жидком расплаве при температуре солидуса;

$\theta_H = \frac{[H]}{[H]_{kr}}, \theta_N = \frac{[N]}{[N]_{kr}}, \theta_H, \theta_N \in [0,1]$  - безразмерные переменные содержания растворимого газа по отношению к предельной растворимости;  $[N], [H]$  - атомарная концентрация газа в расплаве.

Уравнение (18) позволяет оценить критическое значение КП  $K_{1kr}^g$  с учетом количества растворенного в расплаве газа, массовых сил, а также металлостатического давления, в частности:

- установлено, что влияние силы тяжести реализуется по двум механизмам:

- массовые силы гравитации помогают питанию в направлении сверху - вниз и, наоборот, препятствуют питанию снизу-вверх. Это существенным образом влияет на критическое значение КП  $K_{1kr}^g$ ;

- давление в расплаве на границе двухфазной зоны (на ликвидусе) в разных точках границы с различным металлостатическим напором разное и величина этого давления определяет распределение давления внутри двухфазной зоны, что в свою очередь, влияет на критическое значение КП  $K_{1kr}^g$ ;

- установлено, что при увеличении газонасыщенности расплава критическое значение КП  $K_{1kr}^g$  уменьшается, а это существенным образом влияет на точность прогноза пористости с использованием критерия  $K_1$ .

## 5. Разработка технических и технологических решений, предохраняющих отливки от образования в них горячих трещин

Цель теоретического анализа процесса образования горячих трещин в настоящей работе — выявление комплекса существенных для этого процесса факторов, а затем, на основе полученных знаний, разработка технических и технологических решений, предохраняющих отливки от горячих трещин.

Основная причина образования горячих трещин – это неравномерное затвердевание отливки вследствие наличия тепловых узлов. Но кроме этой, необходимо добавить еще одну, не менее важную, а именно возникновение макро- и микропористости в тепловых узлах отливок.

На этот факт обращают внимание целый ряд исследователей, которые отмечают, что начальный этап образования горячих трещин осуществляется одновременно с появлением усадочных микропор, которые играют роль зародышей для микроочагов разрушения и в дальнейшем облегчают развитие трещины. Было показано, что суммарное падение давления в двухфазной области может быть найдено из выражения:

$$\Delta P_{\max} = \frac{180(1+\beta)\mu}{\lambda_2^2 G} \int_{T_s}^{T_k} \frac{E(T)f_s(T)^2}{(1-f_s(T))^3} dT + \frac{180V_s\beta\mu}{\lambda_2^2 G} \int_{T_s}^{T_k} \frac{f_s(T)^2}{(1-f_s(T))^2} dT, \quad (19)$$

где  $\lambda_2$  - есть расстояние между вторичными осями дендритов;  $E(T)$  - функция, связанная со скоростью деформации двухфазной зоны.

В уравнении (19) первое слагаемое в правой части определяет падение давления, связанное с растягивающими деформациями, а второе слагаемое – с усадкой расплава. Сравнение двух факторов, влияющих на образование горячих трещин, а именно растягивающих деформаций и усадки расплава, показало, что они сравнимы между собой.

Таким образом, технологические приемы, позволяющие уменьшить усадочную пористость в отливках, позволяют существенно снизить риск возникновения горячих трещин в отливках.

Но с другой стороны, как показано в работе, деформации растяжения существенно влияют на точность прогноза по усадочным дефектам в отливках, так и на тепловые и фильтрационные процессы в двухфазной области.

Для оценки этого влияния использовалась математическая модель фильтрации междендритной жидкости и теплообмена при деформациях двухфазной зоны, основанная на представлении о затвердевании отливки по дендритному механизму с развитием деформаций, перпендикулярных первичным осям дендритов.

С использованием данной модели получено выражение для относительного количества твердой фазы в виде:

$$f_s = f_{s0} + \Delta f_s = f_{s0} \left( 1 - \frac{2\varepsilon_y + \varepsilon_y^2}{(1 + \varepsilon_y)^2} \right) = \frac{f_{s0}}{(1 + \varepsilon_y)^2} \approx f_{s0} (1 - 2\varepsilon_y), \quad (20)$$

где  $f_{s0}$  - относительная доля твердой фазы до начала деформаций,  $\varepsilon_y$  - относительная деформация.

При положительных (растягивающих) деформациях доля твердой фазы уменьшается, при отрицательных (сжимающих) деформациях повышается.

С учетом (20) выражение для эффективной теплоемкости при деформациях двухфазной зоны приобретает вид:

$$c_{эф} \langle \rho \rangle = \langle c \rangle \langle \rho \rangle + L_{эф} \rho_s \frac{\partial f_{s0}}{\partial T}, \quad (21)$$

где  $L_{эф} = \begin{cases} L_{кр}, & f_{s0} < f_s^* \\ L_{кр} (1 - 2\varepsilon_y), & f_{s0} \geq f_s^* \end{cases}$ ;  $\frac{\partial f_{s0}}{\partial T}$  - темп кристаллизации в неде-

формированной двухфазной зоне.

Из анализа уравнения (21) следует, что для относительной деформации  $\varepsilon_y = 0,05$  эффективная скрытая теплота кристаллизации  $L_{эф}$  уменьшается на 10%, и ее неучет может приводить к большим ошибкам при моделировании затвердевания отливки. Таким образом эффект от выделения скрытой теплоты кристаллизации в деформирующихся областях отливки значительно зависит от величины и вида деформации дендритного каркаса. При деформациях растяжения эффект уменьшается, при деформациях сжатия наоборот увеличивается.

С помощью выражения (20), при малых деформациях получено модифицированное уравнение Кармана - Козени с учетом деформации дендритов:

$$K = \frac{\lambda_2^2 [1 - f_{s0} (1 - 2\varepsilon_y)]}{180\mu} \left( \frac{1}{f_{s0} (1 - 2\varepsilon_y)} - 1 \right)^2. \quad (22)$$

При отсутствии деформаций это уравнение полностью совпадает с обычной формой записи данного уравнения.

Расчеты показывают возрастание проницаемости при растягивающем деформировании ( $\varepsilon_y > 0$ ) и снижение при сжимающем ( $\varepsilon_y < 0$ ) деформировании.

На основании уравнений (19) – (22) получен поправочный коэффициент для расчета критического значения  $K_{1kr}$ , при котором в отливках образуется пористость:

$$K_1 \geq K_{1kr} / n, \quad (23)$$

где  $n = \sqrt{1 + \frac{(1+\beta)}{\beta} \frac{df_{s0}}{d\theta} f_{s0}^* t_3 (1-2\varepsilon_y) \dot{\varepsilon}_y}$  - фактор влияния деформации (ФВД);  $t_3$  - время пребывания точки в двухфазной зоне (время затвердевания);  $df_{s0}/d\theta$  - безразмерный темп затвердевания;  $\theta = \frac{T_L - T(x)}{T_L - T_S}$  - относительная температура;  $f_{s0}^*$  - значение доли твердой фазы, при которой рассчитывается значение критерия пористости (обычно принимается  $\theta \sim 0,9$ );  $\dot{\varepsilon}_y$  - скорость относительной деформации;  $\beta$  - относительная объемная усадка.

Отличие выражение (23) от обычной формы записи критерия  $K_{1kr}$  заключается в наличии делителя  $n$ , зависящего от свойств расплава и условий деформации двухфазной зоны. С учетом ряда преобразований получено выражения для максимального значения делителя  $n$ :

$$n_{max} = \sqrt{1 + \frac{(1+\beta)}{3} \frac{df_{s0}}{d\theta} f_{s0}^* \gamma}. \quad (24)$$

где  $\gamma$  - коэффициент локализации деформаций.

Таким образом, для предотвращения возникновения пористости при растягивающих деформациях необходимы более низкие значения чисел  $K_{1kr}$ , а, следовательно, более высокие градиенты температур и меньшие скорости охлаждения, чем в условиях отсутствия деформаций.

С использованием выражения (24) получены значения коэффициента  $n_{max}$  для сплавов с объемным коэффициентом усадки  $\beta = 0,06$  (соответствует стали и некоторым алюминиевым сплавам) при различных значениях коэффициента локализации деформаций  $\gamma$  и условий диффузии (диффузионных чисел Фурье  $\alpha'$  по Броуди - Флемингсу).

Как следует из расчетов, влияние локализации деформации на коэффициент  $n_{max}$  значительно и в сильной степени зависит от диффузионного числа Фурье  $\alpha'$  в твердой фазе. Быстрое охлаждение отливки ( $\alpha' < 0,1$ ) повышает коэффициент  $n_{max}$ . Высокие значения коэффициента  $n_{max}$  сохраняются и при относительно медленном охлаждении отливки ( $\alpha' > 0,3$ ), и даже при выполнении условий термодинамического равновесия между жидкой и твердой фазой (это состояние соответствует значению  $\alpha' = 0,5$ ).

Полученные результаты позволяют использовать уже существующие методики для оценки пористости по критерию  $K_1$  даже при наличии деформаций в двухфазной зоне. Для этого необходимо корректировать критическое значение числа  $K_{1kr}$  с помощью коэффициента  $n_{max}$ , который зависит от предполагаемой или расчетной степени локализации деформаций. Представленные в работе значения  $n_{max}$  свидетельствуют, что критическое значение числа  $K_{1kr}$  может уменьшиться в несколько раз при растягивающих деформациях. Следовательно, сопротивление усадке, вызывающее растягивающие деформации, опасно не только для возникновения горячих трещин, но и повышает опасность поражения отливки пористостью. В частности данным влиянием деформаций можно объяснить некоторые случаи возникновения пористости в отливках на реальном производстве, в то время как результаты моделирования с помощью коммерческих программ предсказывают ее отсутствие.

Влияние растягивающих деформаций на условия формирования пористости в отливках были изучены в серии специальных экспериментов на алюминиевых сплавах в песчаных формах. Был залит ряд проб, конструкция которых разработана в МГТУ им. Н.Э. Баумана, вырезаны образцы и подготовлены шлифы для определения пористости с и без деформаций растяжения в двухфазной области.

Результаты экспериментов подтвердили теоретические выкладки и показали возрастание процента пористости при затруднении свободной линейной усадки сплава.

#### **6. Разработка универсального критерия, общей модели этапов техпроцесса и единых технологических приемов, обеспечивающих заданные служебные свойства отливок**

В работе были рассмотрены три процесса, влияющие на качество отливок: уплотнение сырой песчано-глинистой смеси (СПГС), формирование усадочных раковин и пористости, напряженно-деформированное состояние отливки при затвердевании. Для каждого из процессов, которые представляют собой сложные системы, были сформированы критерии, позволяющие проводить их оптимизацию.

Уплотнение СПГС относится к подготовительному этапу техпроцесса изготовления отливки, а процессы образования усадочных дефектов и горячих трещин – к окончательному этапу. На Рис.4 показана взаимосвязь этих трех процессов.



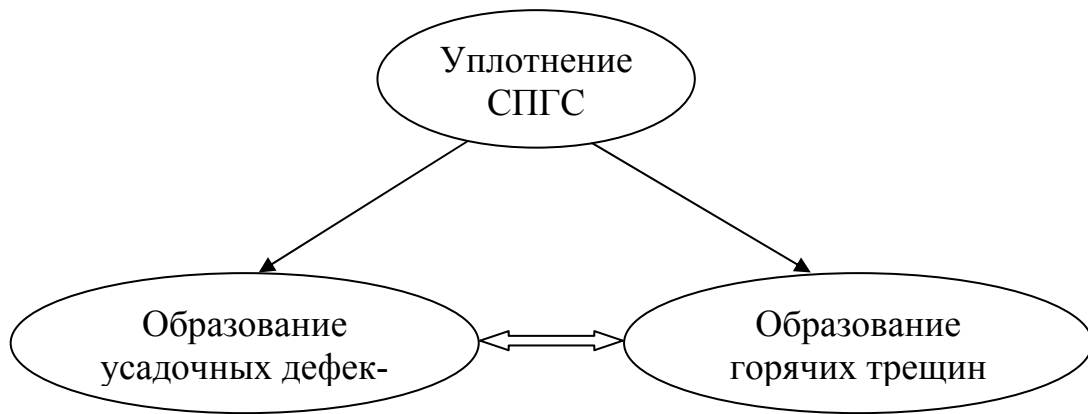


Рис.4. Взаимосвязь этапов техпроцесса

В предыдущих главах для каждого из этапов были предложены критерии, с помощью которых можно добиться получения отливки с заданными служебными свойствами. На Рис.5 показаны схемы для определения значений предложенных критериев.

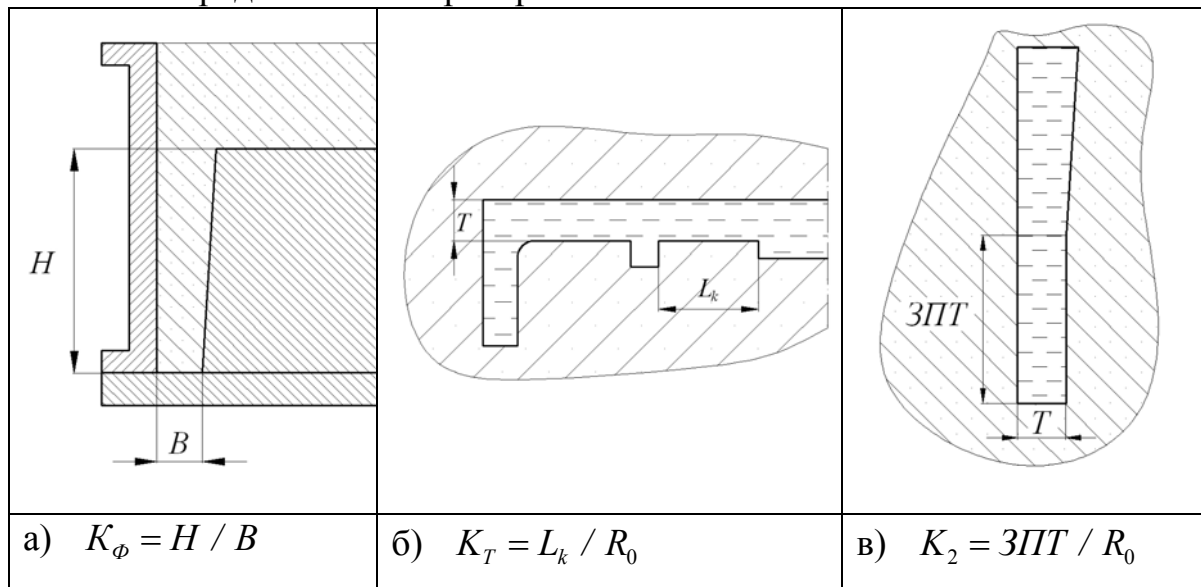


Рис.5. Схемы определения значений критериев

На Рис.5 критерий  $K_\phi$  определяет соотношение высоты модели или опоки к ширине «кармана» (расстоянию между стенками моделей или опоки). Критерий  $K_T$  предназначен для расчета расстояния между элементами затруднения усадки. И, наконец, критерий  $K_2$  позволяет рассчитать зону в отливке, свободную от пористости.

Очевидно, анализируя схемы на Рис.5, что для всех трех разнохарактерных процессов используются критерии, имеющие одинаковую структуру. По существу, критерии определяют отношение зоны в отливке (или форме), отвечающей требованиям по качеству, к приведенному размеру этой зоны отливки (или формы). Тогда, по аналогии, критерий для одного процесса может быть использован для двух других. Для этого достаточно ввести универсальное понятие, которое одинаково применимо к величинам

$L_k$ ,  $H$  и  $ЗПТ$ . Таким универсальным понятием будет бездефектная область ( $БО$ ) отливки или формы.

В связи с этим для определения зон в отливке (форме), отвечающих заданным свойствам, предлагается универсальный критерий  $K$  :

$$K = \frac{БО}{R_0}. \quad (25)$$

Еще один объединительный признак – это близкие значения критических величин этих критериев. Если для  $K_T$  это вполне очевидно, т.к. принято, что этот критерий есть аналог критерия  $K_2$ , то значение критерия  $K_\phi$  явно от двух других критериев не зависит. Однако их значения лежат в одинаковом диапазоне чисел от 8 до 10.

Применяя методы аналогии и реологический подход к описанию поведения объекта, для моделирования трех процессов в работе предлагается использовать единую реологическую модель. Механическая модель, соответствующая этим процессам, представлена на Рис.6.

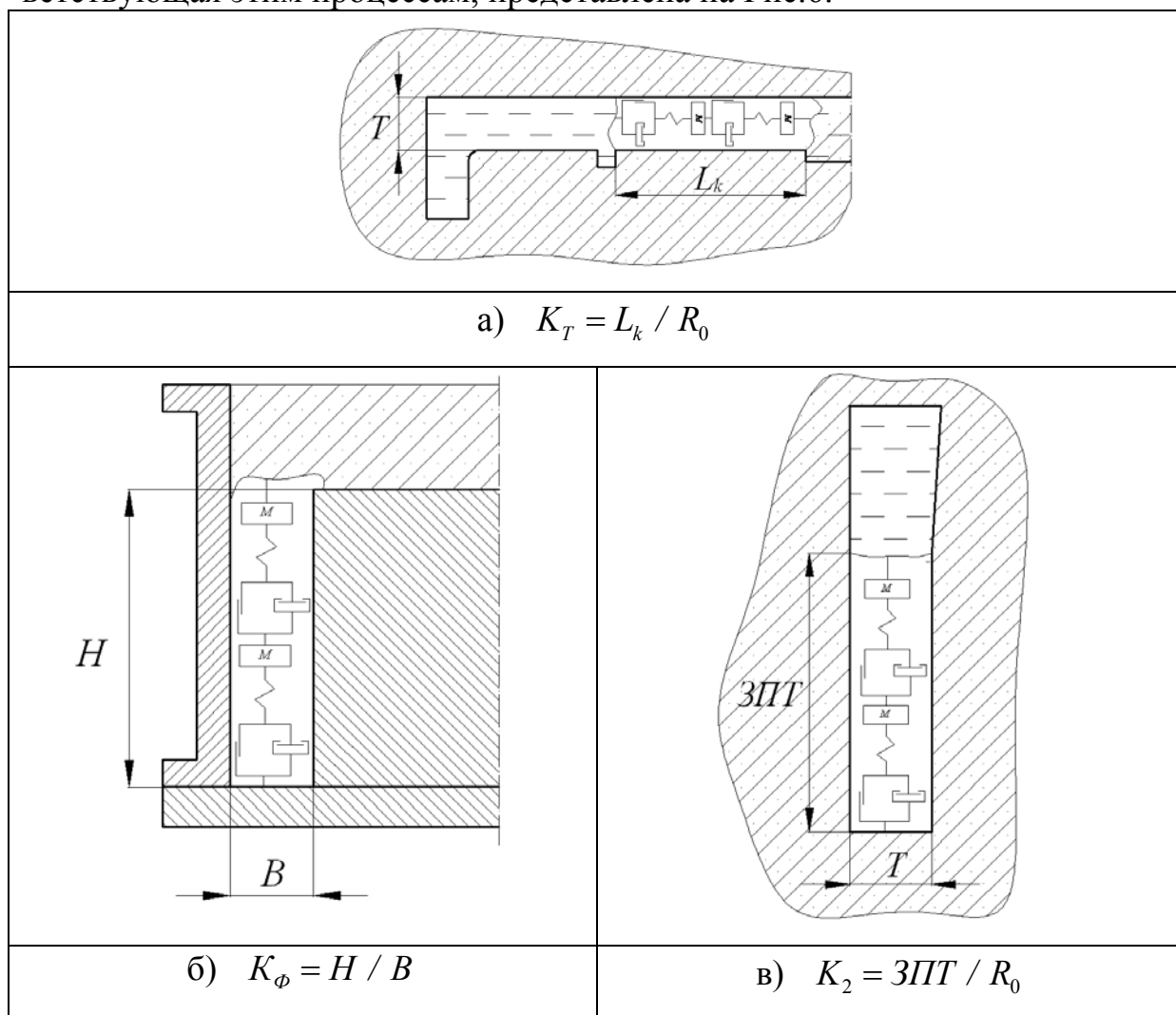


Рис.6. Механические модели и критерии процессов уплотнения СПГС, затвердевания расплава и образования горячих трещин

На Рис.6 показан фрагмент расчетной схемы для одномерной модели напряженного состояния расплава при растяжении, уплотнения СПГС и затвердевания жидкого расплава. На Рис.6 обозначено:  $M$  – масса элементарных объемов, на которые разбивается расчетная область.

Если для описания разных этапов техпроцесса используется одна и та же реологическая модель и единый критерий качества, то по аналогии можно утверждать следующее:

- технологические приемы, разработанные для повышения качества какого-либо из этапов техпроцесса, могут быть использованы для повышения качества любого другого этапа техпроцесса.

В работе приводится ряд примеров, подтверждающих данное правило. Один из них состоит в следующем.

Для повышения качества уплотнения за счет устранения бокового перетекания, был предложен способ уплотнения и оснастка для его осуществления, на который получен патент. Запатентованный способ реализует основное требование к этапу уплотнения СПГС в форме:

- смесь должна уплотняться в форме отдельными, изолированными друг от друга областями (без бокового перетекания в горизонтальных сечениях формы).

Следуя данному требованию, сложная форма разделяется на ряд простых, подобных форме без моделей, качество уплотнения которых можно обеспечить без особых затруднений.

По аналогии, для повышения плотности отливок был предложен способ литья, на который также получен патент. Запатентованный способ реализует то же самое основное требование, но уже к этапу затвердевания отливки в форме:

- жидкий расплав должен затвердевать в форме отдельными, изолированными друг от друга областями (без бокового теплообмена в горизонтальных сечениях формы).

Для устранения горячих трещин в настоящее время уже используется технологический прием – установка дополнительных ребер жесткости. Данный прием также реализует то же самое основное требование, но уже к этапу напряженно-деформированного состояния отливки в форме:

- жидкий расплав должен затвердевать в форме отдельными, изолированными друг от друга областями (без бокового деформирования в горизонтальных сечениях формы).

## **7. Численное моделирование процессов формирования отливок на основе разработанных критериальных зависимостей**

Для того чтобы результаты расчетов были адекватны практике, нужно в первую очередь указать точные значения теплофизических параметров расплава и формы, а также задать краевые условия, которые соответствуют конкретному способу литья.

Для расчета образования усадочных дефектов в отливках в работе использовался пакет программ FLOW – 3D. Проверка расчетов на адекватность проводилась, в частности, и на примере изготовления отливок литьем в кокиль. На Рис.7 показана 3 – D модель отливки с литниково-питающей системой и половина кокиля.

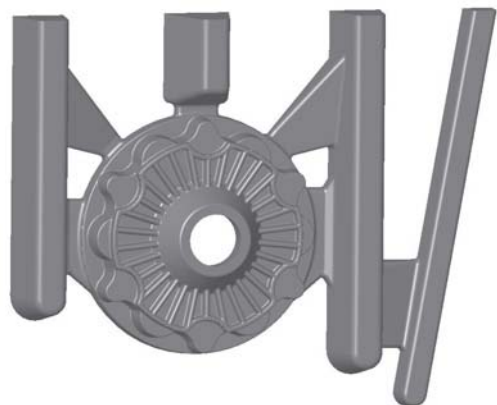


Рис.7. Отливка с литниково-питающей системой и кокиль

Результаты расчетов показали, что в бобышках отливки, а также центральной ее части образуются усадочные раковины (Рис.8).

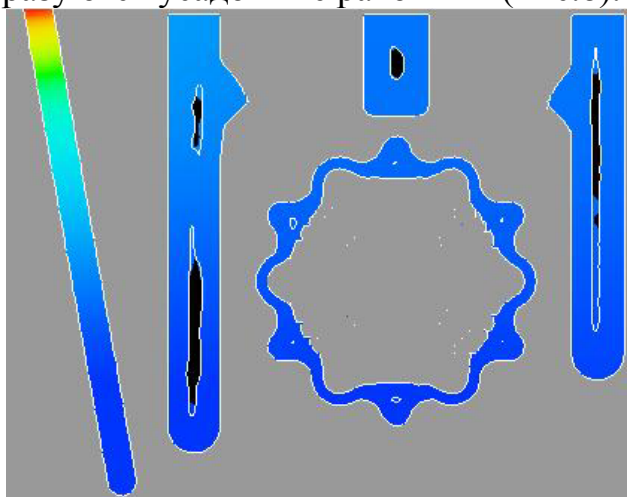


Рис.8. Распределение усадочных раковин в отливке

На Рис.8 показан поперечный разрез отливки. Хорошо видно, что в районе бобышек есть сосредоточенные усадочные раковины.

Рентгеноконтроль изготовленных отливок полностью подтвердил результаты расчетов, Рис.9.

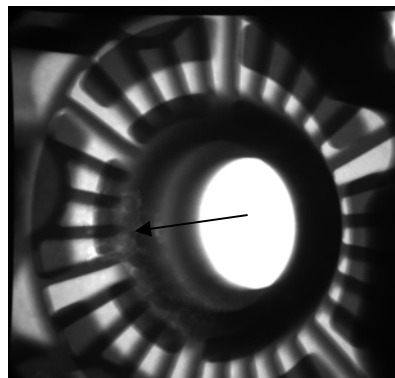
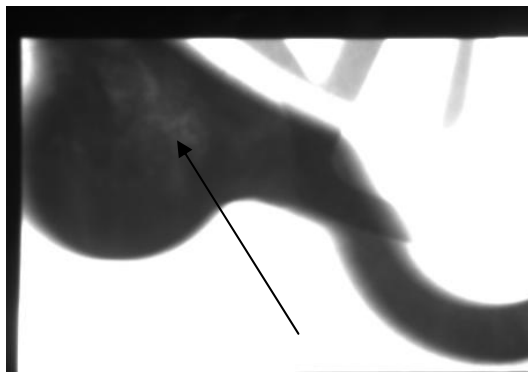


Рис.9. Результаты рентгеноконтроля

На Рис.9 стрелками показаны зоны с усадочными дефектами.

Предложенные в работе новые критерии оценки образования усадочной пористости были использованы при разработке техпроцесса ряда отливок.

Так, на ФГУП ММП «Салют», г. Москва изготавливалась из жаропрочной стали отливка типа «подшипник», Рис.10.

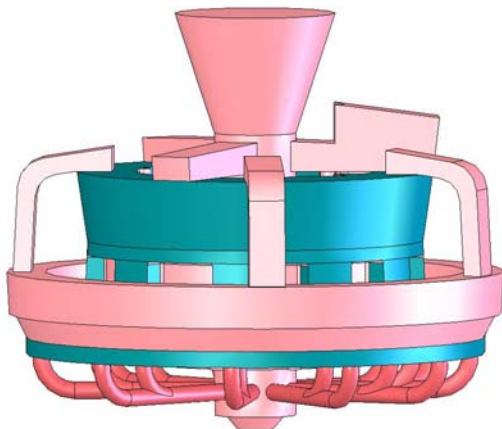


Рис.10. 3-D модель отливки типа «подшипник»

Основной вид брака был связан с неспаем по ободу и усадочными раковинами и пористостью в нижней части отливки.

Результаты моделирования заполнения расплавом формы и затвердевания отливки полностью подтвердили наличие дефектов в отливке. На Рис.11 показаны усадочные дефекты и результаты моделирования.

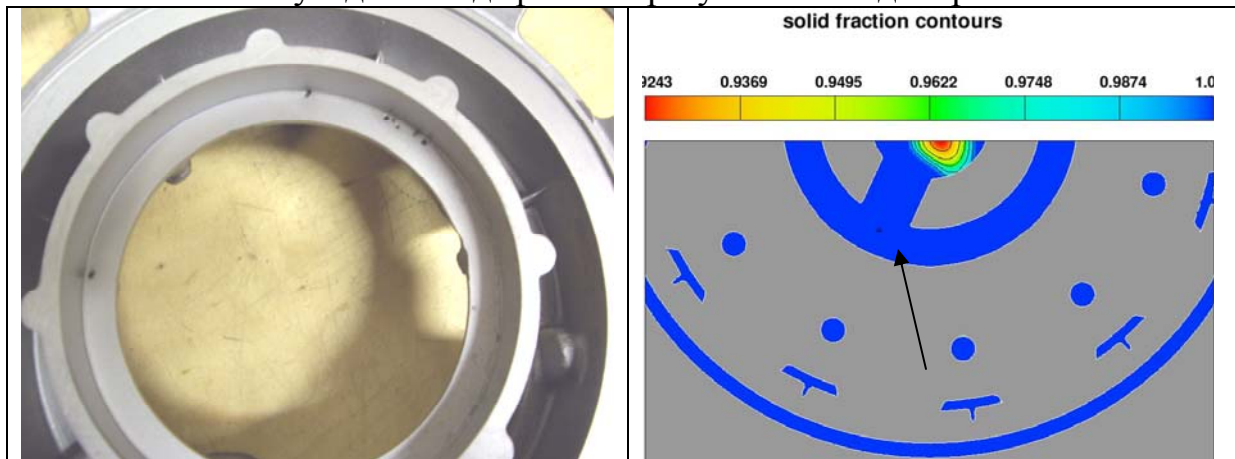
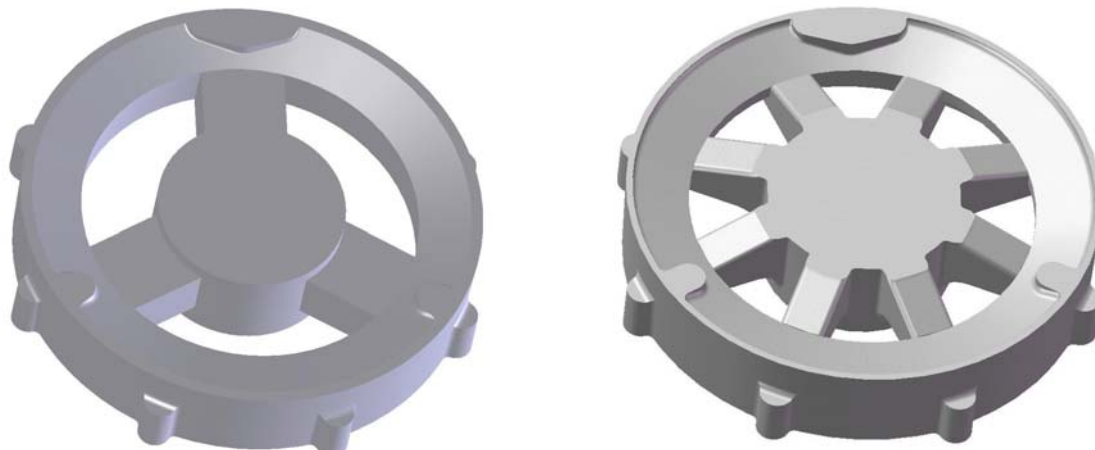


Рис.11. Усадочные дефекты в отливке и результаты моделирования

Анализ заводской технологии показал, что система питания, реализованная на предприятии, не обеспечивает полноценное питание отливки. Используя значение критерия  $K_2$  был произведен расчет необходимого количества питателей, которые нужно подвести к нижней части отливки, прибылей и на Рис.12 показана исходная литниково - питающая система, и рассчитанная по новой методике.



а). Исходная литниковая система      б). Новая литниковая система

Рис.12 Варианты литниковых систем

Новая литниково - питающая система, как показали расчеты, полностью устраняет брак по усадочным дефектам в отливке.

Предложенная в работе методика расчета зоны питания прибылей была использована для ряда других отливок. В результате были получены варианты литниково - питающих систем, которые обеспечивают получение плотных отливок.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложен новый способ изготовления песчаных форм. Разработаны новые конструкции формовочных машин.
2. Для изготовления литейных форм из высокопрочных маловлажных смесей с заданным качеством предлагается правило: смесь должна уплотняться в форме отдельными, изолированными друг от друга областями (с минимальным перетеканием в сечениях, параллельных разъему формы). Алгоритм разбиения смеси на отдельные области следующий: в каждой области должны отсутствовать резкие перепады высот и площадей горизонтальных проекций различных частей отливки.
3. Разработана обобщенная теоретическая модель динамического уплотнения сырых песчано-глинистых смесей, в которой свойства смеси описываются пятиэлементной упруго-вязкопластической реологической моделью, а граничные условия задаются путем моделирования рабочего процесса формовочных машин, что позволяет учесть особенности нагружения смеси при различных способах уплотнения (встряхивание, прессование, импульс сжатого воздуха, фильтрация газа через смесь).

4. Для оценки вероятности формирования пористости разработаны новые критерии,  $K_1$  и  $K_2$ . Критерий  $K_1$  используется в вычислительном моделировании вероятности образования пористости в отливках, а критерий  $K_2$  применяется на ранних стадиях проектирования технологии отливки для расчета длины зоны питания прибылей. Значения критериев выражаются один через другой.
5. В работе предложены научно-обоснованные технологические решения, состоящие в разработке требований к способам уплотнения смеси, расчетных моделей смеси и формовочных машин, внедрение которых позволит сократить сроки проектирования формовочного оборудования и выбирать параметры технологического процесса изготовления форм, обеспечивающих требуемое качество уплотнения смеси.
6. Установлено, что введение в математическую модель уплотнения смеси под действием импульса сжатого воздуха уравнения Навье – Стокса, которое учитывает волновой характер распространения воздуха от клапана импульсной головки к свободной поверхности формы, позволяет существенно повысить точность расчета распределения плотности смеси в форме. Расчетами также показано, что при импульсном нагружении можно выделить три этапа уплотнения смеси, управляя которыми, можно получать заданное распределение плотности смеси в форме.
7. Предложена методика расчета образования пористости в отливке. Особенность предлагаемой методики состоит в том, что критическое значение КП  $K_{1kr}^g$  является величиной переменной и изменяется от точки к точке отливки, в зависимости от металлостатического напора, ориентации фронта кристаллизации относительно силы тяжести и газонасыщенности расплава.
8. Показано, что новый критерий для расчета длины зоны питания прибылей можно использовать для прогнозирования мест образования горячих трещин в отливках и разработки эффективных способов их устранения.
9. Для оценки вероятности получения в песчаной форме и затвердевающей отливке областей, свободных от дефектов (местное недоуплотнение в форме, пористость и горячие трещины в отливке), предлагается использовать универсальный критерий, основанный на отношении протяженности бездефектной области к приведенному размеру этой области в форме или отливке.
10. На основе методов аналогии для расчета уплотнения СПГС в опоке, теплообмена затвердевающей отливки с формой и напряженно-деформированного состояния отливки при затрудненной свободной усадке, предлагается использовать единую упруго-вязкопластическую модель.
11. Разработанные пакеты программ для расчета уплотнения смеси и рабочих процессов формовочных машин были проверены на точность и адекватность. Результаты проверок показали хорошую точность исполь-

зованных численных методов и удовлетворительную адекватность результатов расчета экспериментальным данным.

Внедрение результатов работы:

- пакет программ для расчета уплотнения смеси на встряхивающих машинах был передан в использование в вычислительный центр «Уралвагонзавода», г. Н. Тагил;

- пакет программ для расчета уплотнения смеси на встряхивающих и прессово-встряхивающих формовочных машинах использовался в конструкторском бюро АО «НИИлитмаш», г. Москва;

- полученные в работе критерии для оценки образования усадочной пористости в отливках и расчета длины зоны питания прибылей были использованы при разработке техпроцессов изготовления отливок для ряда оборонных заводов и заводов по производству отливок для железнодорожного транспорта.

- отдельные результаты работы и пакеты программ используются автором при чтении лекций по выбору и «Проектировании технологии литья на ЭВМ» на каф. МТ-5 МГТУ им. Н.Э. Баумана; программы также используются при выполнении студентами курсовых и дипломных работ.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Вербицкий В.И., Коротченко А.Ю. Исследование схем и параметров виброизоляции тяжелых встряхивающих формовочных машин // Технология, оборуд. орг. и экон. машиностроит. пр-ва. Отечественный опыт. Сер.3, экспресс-информация. 1988. № 9. С.10-14.

2. Коротченко А.Ю., Вербицкий В.И. Разработка методики проектирования встряхивающе-прессовых узлов формовочных машин // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Минск. 1988. С. 82-83.

3. Коротченко А.Ю. Общая теория уплотнения сырых песчано - глинистых смесей // Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. Москва. 1998. С. 91.

4. Коротченко А.Ю. Моделирование технологии литья // Машиностроительные технологии.: Тез. докл. Всерос. науч.-тех. конф. Москва. 2008. С. 282.

5. Бавудун И, Коротченко А.Ю. Расчет продолжительности охлаждения отливок в форме // Приложение к журналу Литейное производство. 2002. №12. С.2-3.

6. Коротченко А.Ю., Коньшев А.В., Вербицкий В.И. Реологическая модель динамического уплотнения формовочной смеси // Литейное производство. 1989. № 8. С. 25-27.

7. Коротченко А.Ю. Использование динамических способов при уплотнении сырых песчано-глинистых смесей // Литейное производство. 1991. № 5. С. 31-32.



8. Коротченко А.Ю. Качество формы при импульсном уплотнении // Литейное производство. 1992. № 2. С. 17-18.
9. Коротченко А.Ю. Уточнение математической модели импульсного уплотнения смеси // Литейное производство. 1993. №2-3. С. 22-23.
10. Коротченко А.Ю. Тенденции развития способов изготовления разовых форм из сырых песчано-глинистых смесей // Литейное производство. 1994. № 9. С. 12-14.
11. Коротченко А.Ю. Способы изготовления разовых форм для литья прецизионных отливок // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Машиностроение. 1994. № 4. С. 17-21.
12. Коротченко А.Ю. К теории уплотнения сырых песчано - глинистых смесей // Литейное производство. 1995. №11. С.26-29.
13. Коротченко А.Ю. Математическая модель для расчета уплотнения сырых песчаных смесей // Литейное производство. 2000. №8. С.10-12.
14. Коротченко А.Ю. Моделирование образования усадочных раковин в отливках // Литейщик России. 2009. №2. С.10-13.
15. Романов Д.В., Коротченко А.Ю. Особенности моделирования теплового взаимодействия отливки и формы при литье по выплавляемым моделям // Литейщик России. 2009. №5. С.15-18.
16. Коротченко А.Ю. Критерии образования усадочной пористости в отливках // Литейщик России. 2010. №4. С.43-47.
17. Коротченко А.Ю. К вопросу о «рекламе и действительности» // Литейное производство. 2011. №1. С.38-40.
18. Коротченко А.Ю. Пути повышения прочности и герметичности отливок при литье под давлением // Литейщик России. 2011. №2. С.37-39.
19. Коротченко А.Ю. Новый критерий образования усадочной пористости в отливках // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. №9. С.3-7.
20. Коротченко А.Ю. К вопросу образования горячих трещин в отливках // Литейщик России. 2011. №12. С.17-21.
21. Современные тенденции в развитии САПР отливки: компьютерная система синтеза технологических решений/ В.Коровин [и др.]// Литейщик России. 2012. №2. С.29-35.
22. Новая форма критерия Нияма для предсказания пористости при затрудненной усадке отливок из Al-Cu сплавов/ С. Поляков [и др.] // Литейщик России. 2012. №4. С.23-30.
23. Новый критерий образования микропористости в отливках /С. Поляков [и др.] // Литейное производство. 2013. №7. С.8-11.
24. Влияние массовых сил и газонасыщенности расплава на пористость в отливках/ С. Поляков [и др.] // Литейщик России. 2013. №8. С.40-45.
25. Новый критерий для оценки образования микропористости в отливках/ С. Поляков [и др.] // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 8. DOI: 10.7463/0813.0585558.

26. Компьютерное конструирование технологичных по питанию стальных отливок/ С. Поляков [и др.] // Литейное производство. 2014. №2. С.16-21.

27. Амортизатор встряхивающей формовочной машины: а.с. 1676738 СССР / В.И. Вербицкий, А.В. Коньшев, А.Б. Перельман, Г.А. Соколов, А.Ю. Коротченко, В.И. Сидоров 1991. Бюлл. № 34.

28. Встряхивающая формовочная машина: а.с. 1694318 СССР / В.И. Вербицкий, А.В. Коньшев, А.Б. Перельман, Г.А. Соколов, А.Ю. Коротченко, В.И. Сидоров 1991. Бюлл. № 44.

29. Встряхивающая формовочная машина: а.с. 1678507 СССР / В.И. Вербицкий, Г.А. Соколов, В.И. Сидоров, А.Б. Перельман, А.Ю. Коротченко, А.В. Коньшев 1991. Бюлл. № 35.

30. Способ изготовления разовых литейных форм из сырых песчано - глинистых смесей и оснастка для его осуществления: патент 2069474 РФ /А.Ю. Коротченко, Г.Ф. Баландин, О.А. Беликов и др. 1996. Бюлл. №32.

31. Способ гравитационного литья фасонных отливок: патент 2444415 РФ. / А.Ю. Коротченко. 2012. Бюлл. №7.