

М469191

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА  
ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ  
УЧИЛИЩЕ им. Н.Э.БАУМАНА

=====

На правах рукописи  
УДК 621.74.041.001.57:621.74.002.6

ТРУХОВ Анатолий Павлович

ТЕОРИЯ ПРЕДУСАОЧНОГО РАСШИРЕНИЯ ОТЛИВОК  
В СЫРЫХ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ФОРМАХ И ЕЕ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАЗМЕРНОЙ  
ТОЧНОСТИ ОТЛИВОК

специальность 05.16.04 -  
литейное производство

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва - 1987

Работа выполнена на кафедре "Машины и технология литейного производства" Московского автомеханического института

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
профессор Матвеев И.В.  
доктор технических наук  
профессор Шуляк В.С.  
доктор технических наук  
профессор Корнюшкин О.А.

Ведущее предприятие: Научно-исследовательский институт автотракторных материалов (НИИАТМ) г. Москва

Защита состоится " 9 " марта 1988 г. в \_\_\_\_\_ час.  
на заседании специализированного совета Д.053.15.05 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана по адресу: Москва, 107005, 2-я Бауманская ул., д 5.

Ваш отзыв в I-м экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Бауман 1988г.

Овчинников

Овчинников А.Г.

Объем 2 п.л.  
Н.Э.Баумана.

M469191

Актуальность проблемы. Проблема повышения размерной точности отливок имеет народнохозяйственное значение, поскольку ее решение позволит уменьшить массу отливок и получить экономию металла, уменьшить объем механической обработки отливок, снизить массу изделий и машин и внести вклад в снижение металлоемкости национального дохода.

Особое значение эта проблема приобретает для способов литья в сырые песчано-глинистые формы, на долю которого приходится до  $2/3$  всего выпуска отливок.

Анализ показывает, что основная доля систематических и случайных погрешностей определяется системой "отливка-форма", а их формирование происходит главным образом в период предсудачного расширения.

16.16.97.11  
Большой вклад в разработку представлений о предсудачном расширении и линейной усадке отливок внесли отечественные и зарубежные ученые: Ф.Вюст, Т.Тернер, А.А.Бочвар, В.П.Чернобровкин, Н.И.Новиков, Л.С.Константинов, Г.Ф.Баландин, Ю.А.Степанов, Н.И.Ключнев, В.Р.Балинский, Г.А.Корольков и др. Установлено большое количество факторов, относящихся к металлу и форме и влияющих на предсудачное расширение. Однако полученные данные по влиянию различных факторов противоречивы. Многие экспериментальные факты не имеют удовлетворительного объяснения. К ним следует отнести зависимость предсудачного расширения от длины образцов и их диаметра, различие в 6-10 раз значений предсудачного расширения в продольном (осевом) и поперечном (диаметральном) направлениях, одинаковые значения предсудачного расширения у образцов из серого и белого чугунов и т.д.

Особое значение с практической точки зрения имеет зависимость предсудачного расширения отливок (и, как следствие, их линейной усадки) от номинального значения рассматриваемого размера отливки. Сведения об этой зависимости появились в литературе более 15 лет назад, однако попытки практического ее использования не предпринимались, поскольку физическое обоснование не дано до сих пор. Поэтому в настоящее время в большинстве случаев при проектировании модельной оснастки линейную усадку назначают одинаковой (например, 1% для отливок из серого чугуна), независимо от номинального значения рассматриваемого размера, что является одной из причин появления систематических погреш-

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1469191

Трухов А.П. Теория предсудач



ностей размеров отливок.

Особо остро стоит вопрос проектирования модельно-стержневой оснастки для новых технологических процессов изготовления литейных форм на автоматических линиях и изготовления стержней по нагреваемой оснастке, так как при внедрении этих процессов ожидаемой экономии не получают, а в некоторых случаях отливки утяжеляются.

Важное значение для повышения размерной точности имеет нормирование точностных характеристик отливок, особенно допусков и припусков. Необходимо, чтобы нормы точности были научно обоснованы и базировались на закономерностях формирования размеров отливок, которые также изучены недостаточно.

Цель настоящей работы – повышение размерной точности отливок в сырых песчано-глинистых формах на основе обобщения и развития представлений о предсудачном расширении отливок и разработки теории процесса.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие основные задачи:

- разработка описательной теории процесса предсудачного расширения отливок;
- разработка математических моделей предсудачного расширения отливок и проведение математических экспериментов;
- экспериментальная проверка теоретических положений;
- экспериментальное исследование параметров зоны конденсации в форме, усилий, возникающих при смещении и отрыве отливки от сухой корки по поверхности их контакта, и деформационной способности уплотненных формовочных смесей, определяющих сопротивление расширению отливки и формы;
- проведение статистических исследований для установления закономерностей формирования систематических и случайных отклонений размеров отливок;
- разработка методики определения исполнительных размеров модельно-стержневой оснастки;
- использование теории для разработки научно-технических решений и их внедрение в промышленности.

Цель и задачи диссертационной работы определены в соответствии с Координационными планами научно-исследовательских работ АН СССР (план 1976–1980 гг. п. I. II. 2. 3. I., план 1981–1985 гг. п. I. II. 2. 3. I., позиция 0.2.01).

Научная новизна. 1. Установлено, что процесс предсудачного расширения отливок является результатом взаимодействия трех тел: отливки, сухой корки формы и ее основной массы смеси и определяется свойствами сплава, формы, условиями на поверхностях контакта отливка-сухая корка, сухая корка-основная масса смеси, сопротивлением основной массы смеси предсудачному расширению отливки и конструктивными особенностями отливки и литейной формы.

2. Разработаны математические модели термического расширения сырой формы и предсудачного расширения отливок, в которых для определения напряженно-деформированного состояния сухой корки и последовательно затвердевающей отливки используются представления о растущем теле.

3. Теоретически и экспериментально установлены явления неоднородности деформаций предсудачного расширения и линейной усадки на рассматриваемом размере отливок (кроме диаметров цилиндров и шаров), возникающие главным образом вследствие смещения сухой корки формы относительно основной массы смеси. Неоднородность деформаций является причиной зависимости предсудачного расширения и линейной усадки отливок от номинального значения рассматриваемого размера.

4. Теоретически и экспериментально установлено, что предсудачное расширение пустотелых цилиндрических отливок в диаметральной направлении зависит от диаметра отливок (при одинаковой толщине стенок): с увеличением диаметра предсудачное расширение отливок уменьшается.

5. Установлены зависимости предсудачного расширения от свойств сплава, формы, условий на контактах отливка-сухая корка, сухая корка-основная масса смеси и сопротивления основной массы смеси предсудачному расширению.

6. Разработаны методики по изучению неоднородности деформаций при предсудачном расширении и линейной усадке отливки, по определению сопротивления одновременному смещению отливки относительно формы и отрыву отливки от формы, по определению деформационной способности уплотненных формовочных смесей и литейных форм.

Практическая ценность работы. На основе вышеуказанных положений и результатов исследований установлены статистические зависимости действительной линейной усадки отливок из черных сплавов от номинального значения рассматриваемого размера и других факторов; разработана методика определения исполнительных

размеров модельно-стержневой оснастки; уточнены некоторые положения научно обоснованного нормирования допусков размеров и массы отливок; разработаны представления о механизме образования трещин в безопасных формах после заливки металла, установлены основные факторы и разработаны рекомендации по предотвращению трещин и технологическая проба для определения склонности форм к этому дефекту; развиты представления об образовании ужимин в отливках и на уровне изобретений разработаны способы предотвращения дефекта; уточнена зависимость объема усадочных дефектов в отливках из серого чугуна от углеродного эквивалента.

Реализация результатов работы. В содружестве с коллективами завода "Центролит" (г.Саранск) и агрегатного завода (г.Чебоксары) внедрена методика определения исполнительных размеров модельно-стержневой оснастки. На основе методики разработан проект ОСТ (вторая редакция) для автомобильной промышленности: "Отливки из черных сплавов. Точность отливок. Определение исполнительных размеров модельной и стержневой оснастки для изготовления отливок в песчано-глинистых формах". Результаты исследований использованы при разработке единого ГОСТ 26645-85 "Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров и масс и припуски на механическую обработку" и двух ОСТ для автомобильной промышленности. На заводах "Пензмаш", "Центролит" (г.Саранск), металлургическом и дорожно-размольного оборудования (г.Выкса) внедрены изобретения, защищенные авторскими свидетельствами № 822974 и №822975, что позволило уменьшить брак по ужиминам. На ЗИЛе внедрена технологическая проба для определения трещиностойчивости безопасных форм (а.с. №1225674), в НИИТавтопроме при проектировании транспортных систем автоматических безопасных формовочных линий используются рекомендации по применению боковых прижимов для предотвращения трещин в формах.

Общий экономический эффект от внедрения научно-технических решений составил 768,7 тыс.рублей. Внедрение единого ГОСТ 26645-85 и ОСТов на допуски и припуски для отливок позволит получить экономию 3% металла. Экономический эффект от внедрения ГОСТ только на предприятиях Минстанкопрома составит 700 тыс.рублей. По плану НТП автомобильной промышленности на XII пятилетку за счет внедрения ОСТ на определение исполнительных размеров модельно-стержневой оснастки и ОСТов на допуски и припуски отливок должна быть получена экономия 70 тыс.т черных металлов, а экономический эффект должен составить более 5 млн.рублей в год.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Отливки, изготавливаемые в сырых песчано-глинистых формах, в процессе предусадочного расширения претерпевают деформации, неоднородно распределенные на рассматриваемых размерах (кроме диаметров цилиндров и шаров): на концах деформации больше, чем в середине. Неоднородность деформаций является причиной зависимости предусадочного расширения (среднеинтегральной деформации) от номинального значения размера: чем больше размер, тем меньше предусадочное расширение.

2. Деформации отливки, возникшие в процессе ее предусадочного расширения, алгебраически суммируются с деформациями отливки, происходящими при последующей линейной усадке. Поэтому результирующие деформации отливки также неоднородно распределены на рассматриваемых размерах готовой отливки (кроме диаметров цилиндров и шаров): на концах деформации меньше, чем в середине, а линейная усадка (среднеинтегральная деформация) зависит от номинальных значений этих размеров. Неоднородность деформаций готовой отливки может усиливаться неоднородностью пластических деформаций при затруднении усадки отливки, которые, как правило, происходят в горячих местах (локально).

3. Основной причиной неоднородности деформаций отливки в процессе предусадочного расширения является сопротивление сдвигу сухой корки относительно основной массы смеси, который происходит вследствие термического расширения сухой корки (для отливок из усаживающихся при затвердевании сплавов), термического расширения сухой корки и расширения затвердевающей отливки (расширяющаяся форма — расширяющаяся отливка) или расширения затвердевающей отливки вместе с нерасширяющейся сухой коркой формы.

Смещение отливки относительно сухой корки в процессе предусадочного расширения практически не происходит.

Исключение составляет случай, когда отливка изготавливается из расширяющегося при затвердевании сплава в форме, в которой сухая корка неподвижна, а отливка при расширении в процессе затвердевания способна преодолеть прочность сцепления (касательные напряжения адгезии) на контакте с сухой коркой и начать смещаться относительно нее. В этом случае неоднородность деформаций в процессе предусадочного расширения вызывается силами сопротивления (силами трения), возникающими при смещении отливки относительно формы.

4. Предусадочное расширение и линейная усадка пустотелых

цилиндрических отливок с постоянной толщиной стенки в диаметральном направлении также зависит от номинального значения их диаметров: с увеличением диаметра предсудачное расширение уменьшается, а линейная усадка увеличивается. Причиной этой зависимости является сопротивление предсудачному расширению отливок со стороны основной массы смеси.

5. Для определения напряженно-деформированного состояния сухой корки формы необходимо использование представлений о растущем теле. Напряжения и деформации плоской неравномерно нагретой упругой сухой корки, рассматриваемой как обычное и как растущее тело, существенно различаются. Термическое расширение растущей сухой корки всегда больше термического расширения сухой корки, рассматриваемой как обычное тело.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены на Международном конгрессе литейщиков, Национальной конференции литейщиков ВНР, двух Всесоюзных съездах литейщиков, на 6 Всесоюзных и 4 Республиканских конференциях, научно-технических конференциях МАМИ и АЗЛК, на научных семинарах кафедр "Машины и технология литейного производства" МВТУ им. Н.Э.Баумана и МАМИ.

Совместная работа МАМИ, НИИТавтопрома и завода "Центролит" (г.Саранск) "Формирование, резервы и повышение точности отливок в сырых формах" отмечена дипломом на Всесоюзном конкурсе им. Н.Н.Рубцова.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 46 работ, в том числе 2 монографии, получено 9 авторских свидетельств. Без соавторов опубликовано 11 работ, в том числе одна монография и 10 статей, и получено одно авторское свидетельство.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и приложения, изложена на 275 страницах машинописного текста, содержит 170 рисунков, 25 таблиц, список использованной литературы из 281 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### 1. Теория предсудачного расширения отливок в сырых песчано-глинистых формах.

#### 1.1. Описательная теория.

На основании обобщения и развития представлений о процессе предсудачного расширения отливок в песчано-глинистых формах его предлагается рассматривать как результат силового воздействия трех тел: отливки, сухой корки и основной массы смеси формы.

Процесс можно разделить на два этапа. На первом этапе сплав, залитый в форму, находится в жидком состоянии, на втором - происходит затвердевание отливки.

На первом этапе жидкий металл нагревает форму, происходит образование сухой корки и ее расширение. Расширению сухой корки препятствует основная масса смеси. Жидкий металл следует за расширяющейся сухой коркой, и, таким образом, на первом этапе предусадочное расширение отливки определяется термическим расширением сухой корки, которое зависит от ее свойств и свойств основной массы смеси, конструктивных особенностей формы и отливки и продолжительности первого этапа, которая, в свою очередь, определяется тепловым взаимодействием расплава и формы.

На втором этапе предусадочное расширение отливки будет нарастать вследствие продолжающегося расширения сухой корки, однако при этом предусадочное расширение будет являться результатом взаимодействия трех тел: сухой корки, основной массы смеси и затвердевающей отливки и определяться свойствами сплава, сухой корки и основной массы смеси и условиями на контактах затвердевающая отливка - сухая корка и сухая корка - основная масса смеси, конструктивными особенностями отливки и формы и продолжительностью затвердевания отливки.

В начальные моменты затвердевания сплав имеет низкие механические свойства, а отливка является оболочкой, которая, растягиваясь под действием давления металла, продолжает следовать за расширяющейся сухой коркой формы.

При этом наступает момент, когда перемещения оболочки под действием давления металла будут меньше перемещений расширения сухой корки. Начиная с этого момента, возможно дальнейшее увеличение предусадочного расширения вследствие растяжения усаживающейся затвердевающей отливки расширяющейся сухой корки за счет сил сцепления на их контакте.

По мере охлаждения отливки и повышения прочностных свойств сплава создается ситуация, когда сухая корка не может больше растягивать отливку. В этот момент деформации отливки в процессе предусадочного расширения достигают максимума, и отливка начинает усаживаться. При этом очевидно, что температура, при которой начинается усадка, зависит от свойств сплава, сухой корки, основной массы смеси и всей совокупности технологических факторов.

Выше описан случай расширяющейся формы и усаживающейся при затвердевании отливки. Могут встретиться еще три случая: рас-

пирающаяся форма – расширяющаяся отливка, нерасширяющаяся форма – расширяющаяся отливка, нерасширяющаяся форма – усаживающаяся отливка.

На основании анализа явления можно заключить, что необходимо различать предсудачное расширение сплавов и предсудачное расширение отливок (в том числе отливок-проб (образцов)). Под предсудачным расширением сплава будем понимать расширение, определяемое только свойствами сплава и происходящее вследствие объемных изменений в процессе его затвердевания (например, вследствие выделения графита в чугунах). Предсудачное расширение отливок определяется не только свойствами сплава, но и всей совокупностью технологических факторов (в том числе расширением формы).

Аналогично будем различать линейную усадку сплавов и отливок. Линейную усадку, определяемую по результатам измерений модели и отливки, будем называть действительной.

Выше указывалось, что деформации отливки в процессе ее предсудачного расширения неоднородно распределены на рассматриваемом размере. В связи с этим условимся использовать следующую терминологию. Под предсудачным расширением будем понимать, как это принято в настоящее время, процесс увеличения размеров отливок и среднеинтегральную деформацию (чаще всего в процентах), равную отношению перемещений (удлинений) концевых сечений к длине отливки. Производную перемещений по  $x$  в сечении  $x$  по длине отливки будем называть деформацией в процессе предсудачного расширения.

## 1.2. Математические модели термического расширения сырой литейной формы и предсудачного расширения отливок

При разработке математических моделей предсудачного расширения установлено, что использование обычных представлений для определения термического расширения сухой корки формы при заливке металла, когда температура поверхности быстро (почти мгновенно) становится равной температуре металла, оказалось невозможным. В этом случае получается, что на одной границе сухая корка имеет постоянную температуру, равную температуре испарения воды, а на другой – уменьшающуюся со временем температуру, равную температуре охлаждающегося сплава. Среднеинтегральная температура сухой корки в этих условиях будет уменьшаться и, следовательно, сухая корка должна сокращаться, а не расширяться. Если принять температуру поверхности контакта постоянной, то среднеинтегральная температура также будет сохраняться практически неизменной, и

расширение также не должно происходить. В то же время экспериментальные замеры показывают, что сухая корка сырой формы после заливки металла некоторое время интенсивно расширяется.

Для преодоления описанного противоречия были использованы представления о напряженно-деформированном состоянии растущего тела. Растущим называется тело, которое в течение рассматриваемого промежутка времени увеличивает свою массу и размеры. Отличительной особенностью растущего тела является то, что напряжения в нарастающем слое определяются процессами, происходящими в области растущей границы, и считаются заданными. В последующие после "возникновения" слоя моменты времени напряжения в нем равны сумме заданного напряжения и приращения напряжений за время от момента возникновения слоя до рассматриваемого. Поэтому задача по определению напряженно-деформированного состояния растущего тела должна решаться в скоростях перемещений, деформаций и напряжений.

Разработанная с использованием представлений о растущем теле математическая модель термического расширения сухой корки формы позволила установить, что напряженно-деформированное состояние неравномерной нагретой сухой корки, рассматриваемой как обычное и как растущее тело, существенно различаются. На нагреваемой поверхности плоской сухой корки, имеющей возможность расширяться без возникновения касательных напряжений со стороны основной массы смеси, не имеющей возможности изгибаться (за счет связи с основной массой смеси) и рассматриваемой как обычное тело, формируются сжимающие напряжения. В растущей сухой корке эти напряжения могут иметь любой знак или быть равными нулю.

Если растущую в результате нагрева сухую корку с некоторого момента начать охлаждать, что в ней всегда, независимо от того, произошли ли в ней пластические деформации, будут возникать остаточные напряжения. В обычном теле в упругой области никаких остаточных явлений (напряжений, искривления) возникать не будет.

Термическое расширение растущей сухой корки всегда больше термического расширения сухой корки, рассматриваемой как обычное тело.

Представления о растущем теле использованы в математических моделях термического расширения полости литейной формы и предсудачного расширения отливок. В литейных процессах, которые носят, как принято говорить, эстафетный характер, также необходимо применение представлений о растущем теле (формирование

усадочных раковин, стержней по нагреваемой оснастке и т.п.).

Как показали эксперименты, в реальной форме вместе с расширяющейся сухой коркой перемещается часть слоев, находящихся в основной массе смеси. Для определения расширения сухой корки в реальной форме предположили, что на растущей границе сухой корки приложены касательные напряжения  $\tau_{\varphi}(x, t)$ , а основная масса смеси представляет собой упругое основание. В соответствии с экспериментальными данными приняли, что

$$\tau_{\varphi}(x, t) = K_{\varphi} \cdot \psi \cdot u_{0\varphi}(x, t) = \bar{K}_{\varphi} \cdot u_{0\varphi}(x, t),$$

где:  $K_{\varphi}$  — коэффициент упругости основания (основной массы смеси),

$$\bar{K}_{\varphi} = K_{\varphi} \cdot \psi, \quad \psi = \frac{u_{\varphi}(x, z, t)|_{z=h_{\varphi}(t)}}{u_{0\varphi}(x, t)},$$

$u_{0\varphi}(x, t)$ ,  $u_{\varphi}(x, z, t)|_{z=h_{\varphi}(t)}$  — перемещения поверхностно-то слоя и слоя, находящегося на растущей границе сухой корки,  $h_{\varphi}(t)$  — толщина сухой корки.

Коэффициент  $K_{\varphi}$  определяется экспериментально путем одновременного сдвига сухой корки по растущей границе относительно основной массы смеси. Коэффициент  $\psi$  определяется также экспериментально путем измерения перемещений слоев основной массы смеси, находящихся на разных расстояниях от поверхности контакта отливка-форма. По результатам наших экспериментов  $\psi$  можно принять постоянным и равным 0,3 — 0,4.

С использованием принятых допущений и результатов экспериментов была разработана математическая модель термического расширения сырой литейной формы. Результаты расчетов и экспериментов показали их удовлетворительное совпадение. Кроме того, расчеты и эксперименты показали, что растущая сухая корка является напряженной конструкцией и ее расширение может приводить к искажению геометрии отливки (например, появлению обратного уклона на фланцах протяженных отливок) и вызывать разрушение безопочных форм.

Для разработки математических моделей предсудочного расширения отливок необходимо было сформулировать условия на поверхности контакта отливка-сухая корка. С этой целью были проведены эксперименты по одновременному сдвигу отливки относительно сухой корки и отрыву отливки от сухой корки.

При одновременном сдвиге отливки относительно формы установлено, что напряжения сдвига сначала растут практически без

смещения. Затем продолжается их нарастание при заметном увеличении смещения, и при некоторых значениях смещения (0,1–0,4 мм) напряжения достигают максимума. При дальнейшем смещении происходит уменьшение напряжений в 2 и более раза, а затем они остаются практически постоянными. Первоначальный рост напряжений без смещения связан с образованием адгезионных связей на контакте отливка–форма. Напряжения  $T_{на}$ , при которых начинается смещение отливки относительно сухой корки, названы напряжениями адгезии. Установлены зависимости напряжений смещения отливок–образцов из А7 и серого чугуна от температуры испытания при постоянной температуре заливки, прочности исходной смеси, ее зернового состава, содержания каменноугольной пыли и металлостатического напора.

Сравнение напряжений, возникающих при одновременном смещении отливки относительно сухой корки и сухой корки относительно основной массы смеси, показало, что в период предсудачного расширения напряжения, при которых начинается смещение отливки, больше максимальных напряжений, возникающих при смещении сухой корки относительно основной массы смеси. К этому следует добавить, что известные и собственные прямые эксперименты, в которых производилось одновременное смещение всей затвердевавшей отливки относительно формы без заранее фиксированной поверхности смещения показывают, что всегда смещение отливки происходит вместе с сухой коркой с последующим разрушением формы по зоне конденсации. Поэтому можно заключить, что в период предсудачного расширения происходит в основном смещение сухой корки вместе с отливкой относительно основной массы смеси.

При взаимодействии отливки и формы в диаметральной направлении на поверхности контакта между ними могут возникать нормальные растягивающие напряжения, которые могут привести к нарушению плотного контакта – отрыву отливки. С применением специальной методики установлены экспериментальные зависимости напряжений отрыва отливки из АЛ7 от температуры заливки сплава, давления расплава на форму и прочности на разрыв исходной формовочной смеси.

При разработке математических моделей предсудачного расширения отливок была принята цилиндрическая отливка, которая чаще всего используется в качестве технологической пробы и с применением которой получено наибольшее количество экспериментальных данных.

Задача по определению перемещений и деформаций в продоль-

ном (осевом) и диаметрально (радиальном) направлениях чрезвычайно сложна. Поэтому для определения перемещений и деформаций в продольном направлении приняли коэффициенты Пуассона трех взаимодействующих тел равными нулю, а при определении перемещений и деформаций в диаметрально направлении приняли, что продольные перемещения равны нулю.

С использованием принятых допущений были получены решения для определения предсудачного расширения отливки в продольном направлении для случаев последовательно и объемно затвердевающей отливки при плотном контакте между отливкой и формой и при их смещении друг относительно друга.

Предсудачное расширение в диаметрально направлении определено для случая последовательно затвердевающей отливки при плотном контакте между отливкой и формой до момента отрыва отливки от формы.

Решения названных задач справедливы для всех четырех случаев расширяющейся (нерасширяющейся) формы — усаживающейся (расширяющейся) отливки.

При плотном контакте отливки с формой перемещения отливки в процессе предсудачного расширения  $U_{np}(x, t)$  в продольном направлении и  $U_{np}(z, t)$  в диаметрально направлении равны перемещениям поверхностного слоя формы  $U_{of}(x, t)$  и соответственно  $U_{of}(z, t)$ .

Математическая модель предсудачного расширения в продольном направлении для объемно-затвердевающей отливки может быть записана следующим образом:

$$0 \leq t \leq t^*, \quad \frac{\partial^2 \dot{U}_{of}(x, t)}{\partial x^2} - \beta_{of}^2(t) \cdot \dot{U}_{of}(x, t) = 0;$$

$$U_{of}(x, 0) = 0; \quad U_{of}(0, t) = 0; \quad x = \ell,$$

$$E_{of} F_{of}(t) \frac{\partial \dot{U}_{of}(\ell, t)}{\partial x} - 2\pi \lambda_{of} E_{of} \int_{z_0}^{z_{of}(t)} \Delta \dot{T}_{of}(z, t) z \partial z + \kappa_T \cdot \dot{U}_{of}(\ell, t) = 0.$$

$$t > t^*, \quad \frac{\partial^2 \dot{U}_{of}(x, t)}{\partial x^2} - \beta_{of}^2(t) \cdot \dot{U}_{of}(x, t) = \lambda^2(t) \cdot \left[ \frac{\partial^2 U_{of}(x, t)}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 U_{of}(x, t^*)}{\partial x^2} \right];$$

$$t = t^*, \quad U_{of}(x, t) = U_{of}(x, t^*); \quad U_{of}(0, t) = 0; \quad x = \ell,$$

$$E_{\varphi} \cdot F_{\varphi}(t) \frac{\partial \dot{U}_{0\varphi}(\ell, t)}{\partial x} - 2\pi d_{\varphi} E_{\varphi} \int_{z_0}^{z_{\varphi}(t)} \Delta T_{\varphi}(z, t) z dz + E_m(t) F_m \frac{\partial \dot{U}_{0\varphi}(\ell, t)}{\partial x} + \\ + \dot{\varepsilon}_{mcb}(t) \cdot E_m(t) \cdot F_m + \dot{E}_m(t) \cdot F_m \left[ \frac{\partial U_{0\varphi}(\ell, t)}{\partial x} - \frac{\partial U_{0\varphi}(\ell, t^*)}{\partial x} \right] + \\ + \varepsilon_{mcb}(t) \cdot \dot{E}_m(t) \cdot F_m + K_T \cdot \dot{U}_{0\varphi}(\ell, t) = 0$$

$$\beta_{\varphi}(t) = \sqrt{\frac{\bar{K}_{\varphi} \Pi_{\varphi}}{E_{\varphi} F_{\varphi}(t)}}, \quad \beta_{\varphi m}(t) = \sqrt{\frac{\bar{K}_{\varphi} \Pi_{\varphi}}{E_{\varphi} F_{\varphi}(t) + E_m(t) F_m}}$$

$$\lambda(t) = \sqrt{\frac{\dot{E}_m(t) \cdot F_m}{E_{\varphi} F_{\varphi}(t) + E_m(t) F_m}}, \quad \varepsilon_{mcb}(t) = \alpha_m [T_m(t) - T_m(t^*)],$$

$$\Delta T_{\varphi}(z, t) = T_{\varphi}(z, t) - T_{\varphi m}, \quad F_{\varphi}(t) = \pi [z_{\varphi}^2(t) - z_0^2], \quad F_m = \pi z_0^2, \quad \Pi_{\varphi} = 2\pi z_{\varphi},$$

где: величины с точкой наверху соответствуют их частным производным по времени;

$\varepsilon_{0\varphi}(x, t) = \frac{\partial U_{0\varphi}(x, t)}{\partial x}$  — полная деформация поверхностного слоя сухой корки;  $E_m(t)$ ,  $E_{\varphi}$ ,  $F_m$ ,  $F_{\varphi}(t)$  — модули упругости и площади сечений отливки и сухой корки;  $2\ell$  — длина отливки;  $z_0$ ,  $z_{\varphi}(t)$  — наружный радиус отливки и сухой корки при  $T_{исл} = 373 \text{ K}$ ;  $T_{\varphi}(z, t)$  — функция температур по толщине (радиусу) сухой корки;  $T_{\varphi m}$  — начальная температура формы;  $\Pi_{\varphi}$  — наружный периметр сухой корки;  $z_{\varphi}$  — радиус сухой корки, средний за период времени от  $t=0$  до  $t=t^*$  и от  $t=t^*$  до  $t=t_{max}$ ;  $t^*$  — время, в течение которого заливный в форму металл остается жидким;  $t_{max}$  — время наступления максимума предсудачного расширения;  $K_T$  — коэффициент сопротивления внедрению торцевой сухой корки в основную массу смеси.

Приближенное определение коэффициента  $K_T$  производили путем обработки результатов вычислений перемещений (осадки) торцевой сухой корки, для которых использовали решения теории упругости для полубесконечного пространства. Для проведения расчетов коэффициента  $K_T$  необходимы были сведения о параметрах зоны конденсации и деформационной способности уплотненных формовочных смесей. Разработаны уточненная методика расчета и методика экспериментального определения параметров зоны конденсации, а также ме-

толика определения модуля упругости и коэффициента Пуассона формовочных смесей на стандартном образце, при изготовлении и испытании которого предусмотрено снятие (уменьшение) торцевого и бокового трения.

При разработке математической модели предсудачного расширения последовательно затвердевшей отливки в диаметральном направлении получили уравнение равновесия:

$$\frac{\partial^2 \dot{U}_i(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{U}_i(r, t)}{\partial r} - \frac{\dot{U}_i(r, t)}{r^2} = \frac{1 + \nu_i}{1 - \nu_i} \cdot \alpha_i \cdot \frac{\partial \Delta \dot{T}_i(r, t)}{\partial r},$$

где:  $\dot{U}_i(r, t)$  - скорости радиальных перемещений слоя с радиусом  $r$  в момент времени  $t$  в  $i$ -ом цилиндре: растущей корке отливки присвоен индекс "м", растущей сухой корке - "ф" и основной массе смеси - "см";  $\nu_i$  - коэффициенты Пуассона;  $\Delta \dot{T}_i(r, t)$  - скорости изменения избыточных температур.

Соответствующие уравнения для определения перемещений, являющиеся решением уравнения равновесия, запишутся так:

$$\dot{U}_m(r, t) = \frac{1 + \nu_m}{1 - \nu_m} \cdot \alpha_m \cdot \frac{1}{r} \int_{r_m(t)}^r \Delta \dot{T}_m(r, t) r dr + C_{1m}(t) \cdot r + \frac{C_{2m}(t)}{r},$$

$$\dot{U}_f(r, t) = \frac{1 + \nu_f}{1 - \nu_f} \cdot \alpha_f \cdot \frac{1}{r} \int_{r_f(t)}^r \Delta \dot{T}_f(r, t) r dr + C_{1f}(t) \cdot r + \frac{C_{2f}(t)}{r},$$

$$\dot{U}_{cm}(r, t) = \frac{1 + \nu_{cm}}{1 - \nu_{cm}} \cdot \alpha_{cm} \cdot \frac{1}{r} \int_{r_{cp}(t)}^r \Delta \dot{T}_{cm}(r, t) r dr + C_{1cm}(t) \cdot r + \frac{C_{2cm}(t)}{r}.$$

Шесть неизвестных коэффициентов  $C_{1i}(t)$  и  $C_{2i}(t)$  находятся при решении системы линейных уравнений, составленных для условий на границах трехслойного цилиндра и условий совместности.

Для проведения расчетов по приведенным математическим моделям были разработаны программы для ЭВМ ЕС-1035.

### 1.3. Анализ результатов математических экспериментов

#### 1.3.1. Предсудачное расширение отливок в продольном направлении

Основные расчеты были проведены для объемно затвердевающей отливки при ее плотном контакте с формой.

Для случая расширяющейся формы и усаживающейся отливки из сплава  $Al + 2,52\% Si$  получили привычную кривую перемещений концевых сечений цилиндрической отливки: перемещения интенсивно нарастают сразу после заливки, достигают максимума ближе к концу затвердевания, затем направление перемещений изменяется, и начинается усадка. При этом расчеты показывают, что расширяющаяся сухая корка растягивает затвердевающую отливку до наступления мак-

сумма предсудачного расширения. При  $E_{\varphi} = 80$  МПа для отливки диаметром 50 мм длиной  $2\ell = 500$  мм время наступления максимума предсудачного расширения  $t_{max} = 333$  с, при времени затвердевания - 462 с.

С увеличением длины отливки постоянного диаметра максимальные перемещения концевых сечений увеличиваются нелинейно: до некоторой длины они увеличиваются, затем практически стабилизируются. Предсудачное расширение (средняя деформация) с увеличением длины отливки уменьшается. Анализ показал, что наз. ные зависимости являются следствием неоднородности деформаций отливок по длине: на концах деформации больше, чем в середине. Неоднородность деформации, в свою очередь, зависит от взаимодействия сухой корки и отливки с основной массой смеси, характеризуемого коэффициентом  $K_{\varphi}$ . При увеличении  $K_{\varphi}$  с 7 до 40 МПа/м неоднородность деформаций возрастает, а предсудачное расширение уменьшается в 2 раза. С уменьшением длины отливки неоднородность деформаций уменьшается, а при  $2\ell \leq 50$  мм деформации распределены практически однородно.

Грубо приближенные расчеты, проведенные для случая смещения отливки относительно сухой корки, показали, что неоднородность деформаций за счет смещения отливки относительно сухой корки несколько уменьшается по сравнению с неоднородностью деформаций при плотном контакте, что приводит к некоторому (незначительному) уменьшению предсудачного расширения. Следовательно, основную роль в формировании неоднородности деформаций отливки и в этом случае играет смещение сухой корки вместе с отливкой относительно основной массы смеси.

Напряжения растяжения отливки  $\sigma_m(x, t_{max})$  также неоднородны по длине в соответствии с неоднородностью деформаций: в концевых сечениях они больше, чем в середине. Расчетные напряжения  $\sigma_m(x, t_{max})$  в отливке из  $Al + 2,52\% Si$  значительно превосходят предел текучести, что свидетельствует о протекании пластических деформаций, но в 5-6 раз меньше предела прочности.

Расчетные касательные напряжения  $\tau_m(\ell, t_{max})$  на контакте отливка-форма в несколько раз меньше касательных напряжений адгезии  $\tau_{ma}$ , которые характеризуют начало смещения при одновременном сдвиге отливки относительно сухой корки. Поэтому в процессе предсудачного расширения смещение отливки относительно сухой корки не должно происходить.

Смещение отливки в период предсудачного расширения возможно только в случае, если предотвратить перемещения сухой корки

как вследствие ее расширения, так и вследствие растяжения расширяющейся отливкой. В этом практически не встречающемся случае неоднородность деформаций при предсудачном расширении может возникать из-за сил трения, формирующихся при смещении отливки относительно сухой корки, если сама отливка способна преодолеть сцепление с формой.

Таким образом установлено неизвестное ранее явление неоднородности деформаций отливки в процессе предсудачного расширения отливки, которое позволило объяснить зависимости предсудачного расширения от длины отливки-образца.

При математическом моделировании процесса предсудачного расширения отливок приняли допущение, что сплавы в интервале кристаллизации ведут себя как упругие тела. С другой стороны, известно, что предсудачное расширение отливки полностью отражается на ее конечных размерах. Следовательно, деформации, происходящие в процессе предсудачного расширения, являются остаточными (необратимыми).

Эту противоречивую ситуацию можно объяснить следующим образом. Во-первых, по результатам расчета около 50% расширения происходит пока металл жидкий. Во-вторых, затвердевающая отливка является растущим телом, а растущее тело, расширившись (растянувшись), никогда не возвращается в исходное положение. Наконец, в-третьих, напряжения в отливке больше предела текучести, и в ней происходят пластические деформации. Поэтому упругая отдача после предсудачного расширения отливки незначительна и в экспериментах наблюдается связь линейной усадки и предсудачного расширения. На основании этого можно предположить, что неоднородность деформаций в процессе предсудачного расширения отливки должна приводить к неоднородности распределения деформаций готовой отливки и, как следствие, зависимости линейной усадки отливки от номинального значения рассматриваемого размера.

По результатам расчетов получены зависимости предсудачного расширения от следующих параметров:  $\alpha_{\phi}$ ,  $E_{\phi}$ ,  $\alpha_n$ ,  $E_n$ ,  $K_{\phi}$ ,  $K_T$ ,  $2\ell$ ,  $z_0$

и температуры заливки. Следует отметить сильное влияние коэффициентов  $K_{\phi}$  и  $K_T$ , определяемых свойствами сухой корки и основной массы смеси.

Расчеты усилий сопротивления со стороны торца показали, что усилия в момент  $t_{max}$  достигают значительных величин и вызывают давление на основную массу смеси, превышающее в большинстве случаев статическое давление металла.

### 1.3.2. Предусадочное расширение отливок в диаметрально- направлении.

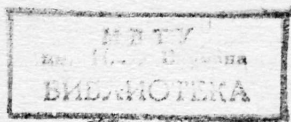
151697mm

Расчеты показали, что в процессе предусадочного расширения отливок из усаживающихся при затвердевании сплавов в диаметрально-направлении в некоторых случаях происходит нарушение плотного контакта (отрыв) отливки и формы. Кроме свойств сплава и формы время отрыва в сильной степени зависит от конструктивных особенностей отливки и формы, особенно от радиуса отливки  $r_0$  и давления металла  $p_m$ . Для сплошной цилиндрической отливки диаметром 30 мм из алюминия А7, затвердевающей за 162 с, время отрыва составляет 65 с при  $p_m = 4,4 \text{ кПа}$  и 95 с – при 13,2 кПа. Для пустотелой цилиндрической отливки диаметром 200 мм с толщиной стенки 15 мм при  $p_m = 4,4 \text{ кПа}$  отрыв не происходит до конца затвердевания, так как к этому времени на контакте отливка-форма еще остаются сжимающие радиальные напряжения, вызываемые давлением металла и равные 2,4 кПа. Следовательно, как уже выше указывалось, в некоторый период времени твердая корка отливки является тонкостенной конструкцией (оболочкой), которая под действием давления металла растягивается и слетает за расширяющейся сухой коркой формы.

В результате расчетов установлено неизвестное ранее явление, заключающееся в том, что деформации предусадочного расширения пустотелых цилиндрических отливок в диаметрально-направлении в условиях сопротивления расширению со стороны основной массы смеси уменьшаются с увеличением диаметра отливок (при одинаковой их толщине). Линейная усадка таких отливок, очевидно, также будет зависеть от их диаметра: с увеличением диаметра линейная усадка будет увеличиваться.

Таким образом, предусадочное расширение отливок в продольном и диаметрально-направлении зависит от номинального значения рассматриваемого размера, и эти зависимости имеют одинаковый характер. Различие предусадочного расширения на одной отливке-пробе по диаметру и по длине является закономерным явлением, поскольку номинальные значения этих размеров сильно различаются.

В результате расчетов установлено, что с уменьшением толщины слоя смеси между отливкой и опокой предусадочное расширение отливок в диаметрально-направлении уменьшается. В безопочных формах наблюдается противоположная картина. Предусадочное расширение отливок в безопочных формах (при прочих равных условиях) больше, чем в опочных, поэтому можно предсказать, что размеры отливок в безопочных формах будут больше, чем в опочных.



#### 1.4. Экспериментальное исследование кинетики и особенностей предсудачного расширения отливок

Для проведения экспериментальных исследований были разработаны три методики. В соответствии с первой проводили измерения перемещений концевых сечений образца, заливаемого в обычную (закрытую) форму. Условия, при которых происходят перемещения концевых сечений, изменяли по трем вариантам. В первом варианте перемещения концевых сечений отливки и формы происходило без затруднений, во-втором – торцевая сухая корка внедрялась в слой формовочной смеси толщиной 120 мм, в третьем – перемещения сухой корки были подавлены опокой, а отливка для реализации своих перемещений должна была преодолеть силы трения на контакте отливка-форма.

Во второй методике использовали открытую форму и перемещения измеряли в различных сечениях по длине отливки прямоугольного сечения, что позволяло фиксировать неоднородность деформаций. Для исключения взаимодействия с металлом нагрев формы осуществляли также горячим стержнем, устанавливаемым в полость формы.

В третьей методике использовали открытую форму и измеряли перемещения пустотелых цилиндрических отливок и формы в диаметрально направленном направлении.

Расчетные и экспериментальные кривые перемещений различных сечений отливки в продольном направлении во времени и зависимости максимальных перемещений концевых сечений от длины и диаметра отливки, коэффициента линейного расширения сухой корки, сопротивления расширению со стороны торца, а также неоднородность распределения деформаций по длине в целом удовлетворительно совпадают. Возникающая в расширяющихся формах на основе кварцевого песка неоднородность деформаций предсудачного расширения и линейной усадки отливок из нерасширяющегося А7, расширяющейся сурьмы, а также серого и белого чугунов и сплавов АД9 и Бр.ОЦНЗ-7-5-1 имеет одинаковый характер.

При сравнении распределения деформаций при заливке расплавленным алюминием А7 и при нагреве формы излучением установлено, что неоднородность деформаций предсудачного расширения отливок в основном определяется неоднородностью термического расширения формы.

Установлено, что распределение деформаций готовой отливки определяется распределением деформаций предсудачного расширения. Поэтому по неоднородности деформаций предсудачного расширения можно судить о неоднородности распределения деформаций

линейной усадки, а по распределению деформаций готовой отливки можно судить о распределении деформаций предусадочного расширения.

При экспериментальном изучении влияния газонасыщенности установлено, что в расширяющейся форме предусадочное расширение цилиндрических отливок из обычного и газонасыщенного сплава  $Al + 2,52\% Si$  практически одинаково. Отливки из обычного и газонасыщенного сплава в период предусадочного расширения не преодолевают силы трения на контакте отливка-форма. Распределение деформаций готовых цилиндрических образцов из обычного и газонасыщенного сплава  $Al9$  также практически одинаково. На этом основании был сделан вывод, о при атмосферном давлении и сопротивлении формы расширению газонасыщенность сплавов в допустимых с точки зрения качества отливок в пределах не влияет или слабо влияет на предусадочное расширение. О том, что давление газа в усадочных порах реальных отливок невелико, свидетельствует эффективная работа прибойей, возникновение утяжин, а также результаты известных из литературы экспериментальных измерений.

Установлено, что перемещения сечений формы и отливки в период предусадочного расширения вблизи фланца больше перемещений формы и отливки без фланца, поскольку термическое расширение сухой корки в случае фланцевой отливки протекает с меньшим затруднением. Объяснить это различие перемещений расширением сплава не удастся, так как перемещения отливки с фланцем должны быть меньше из-за большей площади внедрения отливки в основную массу смеси.

В отливках из сплавов, имеющих в интервале температур кристаллизации низкие по сравнению с сухой коркой механические свойства, предусадочное расширение определяется в основном термическим расширением сухой корки формы и достигает существенных величин. В отливках из тугоплавких усаживающихся сплавов, у которых механические свойства нарастают интенсивно и быстро превышают свойства сухой корки, предусадочное расширение практически не развивается. Примером могут служить углеродистые стали, предусадочное расширение отливок из которых составляет  $0,02-0,04\%$ .

Неоднородность деформаций линейной усадки, а, следовательно, неоднородность деформаций предусадочного расширения установлена также на цилиндрических отливках из серого чугуна  $СЧ20$ , изготовленных в формах из жидкостекольных смесей и смесей на синтетических смолах (ХТС). Линейная усадка в середине отливок и среднеинтегральная линейная усадка увеличивается в ряду форм из смесей: песчано-глинистой, жидкостекольной и ХТС.

Зависимость предусадочного расширения в диаметральном направлении пустотелых цилиндрических отливок от их диаметра, установленная теоретически, подтвердилась при проведении экспериментов на кольцевых отливках: с увеличением диаметра отливок (при их одинаковой толщине) предусадочное расширение уменьшается.

## 2. Экспериментальное исследование систематических и случайных отклонений размеров отливок

Разработка математических моделей предусадочного расширения и линейной усадки реальных сложных отливок пока затруднительна, поэтому была поставлена задача установления статистических зависимостей действительной линейной усадки, необходимых для проектирования модельной оснастки. При постановке статистических исследований исходили из принципиального характера зависимости линейной усадки от номинального размера, выявленного при теоретическом анализе и математическом моделировании процесса предусадочного расширения отливок.

Установлено, что зависимость действительного припуска  $\Delta \ell_g$  на усадку для модельной оснастки может быть описана функцией, включающей свободный член, прямолинейную функцию и гиперболический тангенс от среднего размера  $\bar{X}$ . Для размеров  $\bar{X} \leq 500$  мм, которые наиболее характерны для сырой формовки, оказалось возможной линеаризация гиперболического тангенса, поэтому статистические результаты измерений обрабатывали по уравнению  $\Delta \ell_g = k\bar{X} + c$  ("—" относится к размерам отливок, охватываемым формой, "+" — к размерам, охватывающим форму). Действительная усадка  $\varepsilon \ell_g =$

$(k \mp \frac{c}{\bar{X}}) \cdot 100\%$ , следовательно, является нелинейной функцией среднего размера. Коэффициенты "к" и "с" зависят от вида сплава, типа производства и вида размера (образован одно- или двумя полукругами). Действительная усадка отливок на размерах, охватываемых формой, при определенных значениях  $\bar{X}$  равна нулю, при меньших — отрицательна, при больших — положительна. Характер зависимости, установленный при разработке теории, подтвердился при статистических исследованиях. Зависимость  $\varepsilon \ell_g = f(\bar{X})$  может смещаться вверх — вниз, вправо — влево, но ее характер сохраняется.

На систематические погрешности размеров, выполняемых стержнями, изготовленными по нагреваемой оснастке, влияют особенности формирования стержня. Установлено, что при извлечении стержня из нагреваемой оснастки происходит упругая отдача. Известно также, что после охлаждения стержня его размеры становятся меньше размеров нагретой и больше размеров холодной оснастки. Если

бы в стержне в процессе формирования возникала только упругая деформация, то размеры стержней после охлаждения были бы равны (приблизленно) размерам нагретой оснастки. Следовательно, при формировании стержня происходят как упругие, так и пластические деформации, что следует учитывать при проектировании стержневой оснастки. В результате исследований получены необходимые для этого данные.

При обработке результатов замеров отливок установлено, что до 60% испытуемых размеров имеют случайные отклонения, превышающие допустимые по 3 классу точности ГОСТ 1855-55 и 2009-55, что свидетельствует о принципиальном недостатке существующих стандартов и необходимости разработки новых с увеличенным количеством классов.

С помощью пассивного эксперимента установлено, что доля влияния колебаний влажности, твердости формы и температуры заливки белого чугуна на отклонения размеров, образованных одной полуформой, с увеличением номинального размера уменьшается. Доля же влияния колебаний химсостава, определяющего усадку с лива, напротив – увеличивается. Полученный результат является экспериментальным доказательством необходимости использования в уравнении единицы допуска размеров отливок степенной и линейной функций.

Установлено, что повышение точности отливок в автоматизированном производстве по сравнению с поточно-механизированным примерно на одну треть достигается за счет уменьшения влажности и повышения твердости, а на две трети – за счет более высокой технологической дисциплины.

На основании статистических исследований в совместных работах с НИИТавтопромом установлено, что постоянный множитель, принятый в системе допусков на механическую обработку равным 1,6, не может быть использован в системе допусков на размеры отливок, поскольку, несмотря на существенные изменения технологического процесса (переход с поточно-механизированного на автоматизированное производство, перевод отверждения стержней из сушил в нагреваемую оснастку и т.п.) допуски размеров отливок будут оставаться в одном классе. Поэтому для системы допусков на размеры необходимо принимать множитель 1,25.

### 3. Использование теории при разработке научно-технических решений и их внедрение в промышленности

На основе результатов исследований совместно с НИИТавтопромом разработана методика определения исполнительных размеров мо-

дельно-стержневой оснастки, в которой использованы установленные статистические зависимости припуска на усадку от номинального значения рассматриваемого размера и закономерности формирования стержней в нагреваемой оснастке. Принципиальной особенностью методики является то, что припуск на усадку для модельной оснастки нелинейно зависит от номинального значения рассматриваемого размера и зависит также от вида размера (образован одной или двумя полуформами) и типа производства (автоматизированное, поточно-механизированное).

Методика использована при разработке проекта ОСТ (вторая редакция) для автомобильной промышленности "Отливки из черных сплавов. Точность отливок. Определение исполнительных размеров модельной и стержневой оснастки для изготовления отливок в сырых песчано-глинистых формах", применение которого на заводе отрасли позволит сэкономить 2-2,5% черных металлов.

Внедрение методики осуществлено в творческом содружестве с коллективами завода "Центролит" (г.Саранск) и агрегатного завода (г.Чебоксары).

Разработана также методика учета неоднородности распределения предсудачного расширения (линейной усадки), при применении которой будет предотвращено смещение бобышек, отверстий и других элементов отливки.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований использованы при разработке единого ГОСТ 26645-85 "Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров и масс и припуски на механическую обработку" и двух ОСТ для автомобильной промышленности: ОСТ 37.002.1073-87 "Отливки из черных и цветных металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку" и ОСТ 37.002.1054-87 "Отливки из черных и цветных сплавов. Точность отливок. Назначение и оценка уровня точности отливок, изготавливаемых различными технологическими методами".

Представления о термическом расширении растущей сухой корки использованы при рассмотрении причин образования трещин в безопочных формах с вертикальным разъемом после заливки. Теоретически и экспериментально показано, что основной причиной, вызывающей образование трещин в безопочных формах являются увеличивающиеся во времени напряжения, возникающие в основной массе смеси вследствие расширения растущей сухой корки формы, а уровень начальных напряжений, формирующихся в основной массе смеси формы в процессе изготовления, транспортировки и заливки,

влияет на время образования трещин. Показано, что одним из эффективных способов предотвращения трещин является приложение бокового давления с помощью упругих прижимов и разработаны рекомендации по их применению. Для оперативного анализа причин появления трещин разработана на уровне изобретения технологическая проба, внедренная на ЗИЛе. Показано также, что одной из основных причин различия действительной усадки изготавливаемых в безопасных формах с вертикальным разъемом отливок в направлениях, перпендикулярном и параллельном плоскости разъема, является предусадочное расширение отливок: в направлении плоскости разъема расширение реализуется полнее.

Результаты исследований использованы также для развития представлений о механизме образования ужимин. Установлено, что отрыв сухой корки от основной массы смеси по зоне конденсации происходит под действием изгибающих моментов, которые возникают в местах сопряжения горизонтальных и вертикальных (наклонных) поверхностей литейной формы и суммируются с термическими моментами. Экспериментально найдены зависимости времени отрыва сухой корки от конструктивных параметров: соотношения размеров и радиуса сопряжения поверхностей. Разработано устройство (на уровне изобретения) для определения склонности формовочных смесей к образованию ужимин. Также на уровне изобретений разработаны способы предотвращения ужимин, которые внедрены на ряде заводов.

Обработка данных института теплофизики СО АН СССР по определению плотности доэвтектических чугунов позволила установить, что зависимость объема усадочных дефектов от углеродного эквивалента ( $C_E$ ) в отливках, изготавливаемых в податливые формы, имеет минимум при  $C_E = 3,75-4,0\%$ . В производственных условиях завода "Центролит" (г.Саранск) путем снижения средних значений углеродного эквивалента с 4,17 до 4,02% достигнуто уменьшение брака тормозных цилиндров по усадочным дефектам с 7,0 до 0,7%.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

I. Предусадочное расширение отливок в сырых песчано-глинистых формах является результатом силового взаимодействия трех тел: отливки, сухой корки формы и ее основной массы смеси, и определяется свойствами сплава, формы, условиями на контакте отливка-сухая корка, сухой корка-основная масса смеси, сопротивлением основной массы смеси предусадочному расширению и конструктивными особенностями отливки и формы.

2. Путем математического моделирования и проведения экспериментов по специальным методикам с замером перемещений в различных сечениях отливки установлено, что деформации отливки в процессе предсудачного расширения неоднородны на рассматриваемом размере (длине) (кроме диаметров шаров и цилиндров): на концах деформации больше, чем в середине.

3. Неоднородность деформаций является основной органической причиной зависимости предсудачного расширения от номинального значения рассматриваемого размера: с увеличением размера предсудачное расширение уменьшается.

4. Неоднородность деформаций в отливке в процессе предсудачного расширения является основной причиной неоднородности распределения деформаций линейной усадки и ее зависимости от номинального значения размера. Неоднородность деформаций линейной усадки может усиливаться вследствие пластических деформаций при ее затруднении, которые, как правило, происходят в горячих местах отливки (локально).

5. При математическом моделировании и при проведении экспериментов установлено, что в период предсудачного расширения при силовом взаимодействии затвердевающей отливки, сухой корки и основной массы смеси в основном происходит смещение сухой корки относительно основной массы смеси, а смещение отливки относительно сухой корки практически не происходит.

6. Сопротивление смещению сухой корки относительно основной массы смеси является причиной неоднородности деформаций в процессе предсудачного расширения. Смещение сухой корки происходит вследствие ее термического расширения (для отливок из усаживающихся при затвердевании сплавов), совместного расширения сухой корки и отливки (расширяющаяся форма — расширяющаяся отливка) или расширения отливки вместе с нерасширяющейся сухой коркой формы.

7. Предсудачное расширение и линейная усадка пустотелых цилиндрических отливок с одинаковой толщиной стенок в диаметральном направлении зависят от номинального значения их диаметров: с увеличением диаметра предсудачное расширение уменьшается, а линейная усадка увеличивается. Причиной этой зависимости является сопротивление предсудачному расширению отливок со стороны основной массы смеси.

8. Анализ термического расширения сухой корки, которая с течением времени изменяет свою толщину, показал, что для определения ее напряженно-деформированного состояния необходимо ис-

пользовать представления о растущем теле, а также учитывать эти представления при рассмотрении других литейных процессов, в частности, при формировании усадочных дефектов, стержней в нагреваемой оснастке.

9. Сухая корка, образующаяся в литейной форме, играет важную роль в процессе формирования отливки: определяет неоднородность деформаций предусадочного расширения и линейной усадки, ее расширение является причиной образования трещин в безопочных формах после заливки, обратного уклона на отливках.

10. При обработке результатов целенаправленных статистических измерений металлических моделей и отливок из серого, белого и ковкого чугунов и углеродистой стали на заводах автомобильной промышленности установлено, что действительная линейная усадка зависит от среднего значения размера  $\bar{X}$  отливки. Эту зависимость для  $\bar{X} \leq 500$  мм можно описать уравнением:  $\varepsilon_{Lg} = \left( k + \frac{c}{\bar{X}} \right) \cdot 100\%$ .

Коэффициенты "к" и "с" зависят от вида сплава, вида размера (образован одной или двумя полуформами) и типа производства (точно-механизированное, автоматизированное).

II. Основные положения диссертации были использованы при разработке проекта ОСТ (вторая редакция) для автомобильной промышленности "Отливка из черных сплавов. Точность отливок. Определение исполнительных размеров модельной и стержневой оснастки для изготовления отливок в сырых песчано-глинистых формах", единого ГОСТ 26645-85 "Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров и масс и припуски на механическую обработку" и двух ОСТ для автомобильной промышленности: ОСТ 37.002.1054-87 "Отливки из черных и цветных металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку" и ОСТ 37.002.1073-87 "Отливки из черных и цветных металлов и сплавов. Точность отливок. Назначение и оценка уровня точности отливок, изготавливаемых различными технологическими методами".

12. Общий экономический эффект от внедрения разработанных научно-технических решений составил 768,7 тыс. рублей. По плану научно-технического прогресса автомобильной промышленности на двенадцатую пятилетку за счет внедрения ОСТ на определение исполнительных размеров модельно-стержневой оснастки и ОСТов на допуски размеров и припуски на механическую обработку отливок предусматривается получение экономии 70 тыс. тонн черных металлов с экономическим эффектом около 5 млн. рублей.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. Константинов Л.С., Трухов А.П. Напряжения, деформации и трещины в отливках. - М.: Машиностроение, 1981. - 200 с.
2. Трухов А.П. Усадочные явления в чугунных отливках. - М.: Машиностроение, 1985. - 44 с.
3. Аксенов П.Н., Трухов А.П., Леснов В.Н. Прибор для испытания сырых формовочных смесей на горячую податливость. - Литейное производство, 1970, №3, с.20-21.
4. Аксенов П.Н., Трухов А.П. Факторы геометрической точности отливок в литейно-массовом производстве. - Литейное производство, 1970, №1, с.5-6.
5. Аксенов П.Н., Трухов А.П., Ле-Конг-Ха. Распределение влажности в сырой литейной форме при заливке. - Известия вузов. Машиностроение, 1972, №7, с.110-115.
6. Аксенов П.Н., Трухов А.П. Аналитический расчет зоны конденсации в литейной форме. - Литейное производство, 1972, № 5, с.19-21.
7. *Aksenov P.N., Truchov A.P. Analytische Berechnung der Kondensationszone in der Giessform. - 38. Internationales Giesserikongress. - Düsseldorf, 1971. - 8 S.*
8. Размерная точность отливок/ А.П.Трухов, Э.Ф.Киян, Ф.С.Кваша и др. - Современные способы получения высококачественных литых заготовок: - М.: МДНТП, 1973, с.3-10.
9. Исследование точности автомобильных отливок и пути ее повышения/П.Н.Аксенов, А.П.Трухов, Ф.С.Кваша и др. - Повышение точности отливок и эксплуатационной надежности литых деталей: Тез.докл. XXVII Всес.конф. - Одесса, 1975, с.119-120.
10. Трухов А.П. Оценка деформационной способности сырых литейных форм. - Получение высококачественных литых заготовок в разовые формы. - М.: МДНТП, 1976, с.83-88.
11. Исследование точности автомобильных отливок/П.Н.Аксенов, А.П.Трухов, Ф.С.Кваша и др. - Научно-технический прогресс в автомобильной промышленности, 1976, вып.5, с.3-7.
12. Исследование размерной точности чугунных отливок/П.Н.Аксенов, А.П.Трухов, Ю.А.Сорокин и др. - Развитие методов и процессов образования литейных форм. - М.: Наука, 1977, с.124-131.
13. Аксенов П.Н., Трухов А.П., Сорокин Ю.А. Точность чугунных отливок в условиях массового производства. - Литейное производство, 1978, № 2, с.25-26.

14. Трухов А.П. Деформация сырой литейной формы под действием давления металла и ее влияние на точность отливок. - Литейное производство, 1978, №6, с.21-23.

15. Трухов А.П., Сорокин Ю.А. Выявление систематических погрешностей в размерах отливок и их устранение. - Литейное производство в автомобилестроении, 1980, вып. I, с.164-171.

16. О механизме предусадочного расширения отливок. М.Ю. Ершов, А.П.Трухов, А.Ю.Урушев и др. - Литейное производство в автомобилестроении, 1980, вып. I, с.151-158.

17. Константинов Л.С., Трухов А.П., Ершов М.Ю. О механизме предусадочного расширения. - Технология автомобилестроения: Сб./НИИНавтопром, 1978, № 10, с.1-3.

18. Трухов А.П. Пути повышения точности отливок в сырых песчано-глинистых формах. - Прогрессивные технологические процессы в машиностроении и задача быстрого их внедрения в производство: Тез. докл.респ.конф.-Ташкент, 1978, с.18-19.

19. Трухов А.П. Точность отливок в сырых песчано-глинистых формах. - Повышение эффективности производства и качества литых заготовок: Тез.докл. I Всес.съезда литейщиков. - Минск, 1978, с.35-36.

20. Трухов А.П., Ершов М.Ю. Неравномерность усадки отливок по длине. Причины и последствия. - Технология автомобилестроения: Сб./НИИНавтопром, 1980, №3, с.6-9.

21. Трухов А.П., Ершов М.Ю. Предусадочное расширение отливок в сырых формах. - Литейное производство, 1979, № II, с.16-17.

22. Книпер С.В., Трухов А.П. Температурная деформация и напряжения при изготовлении стержней в нагреваемой оснастке. - Тракторы и сельхозмашины, 1981, № 10, с.37-39.

23. Трухов А.П. Модельная оснастка и точность отливок, получаемых в сырых формах автоматизированного производства. - Проблемы литейной оснастки и качество отливок: Тез.докл. XXX Всес.конф. - М., 1981, с.51-53.

24. Волкомич А.А., Трухов А.П. Формирование и резервы повышения точности отливок. - Пути рационального использования и экономии металла в литейном производстве: Тез.докл.XXXI Всес.конф. - М., 1981, с.23-24.

25. Трухов А.П. Модельно-стержневая оснастка и точность отливок. - Повышение технического уровня литейного производства машиностроительных предприятий Сибири и Дальнего Востока:

Тез. докл. XXXII Всес. конф. - Улан-Удэ, 1982, с. 51-52.

26. Трухов А.П. Основы теории линейной усадки и повышение точности отливок в сырых формах. - Перспективы развития литейного производства и совершенствование технологических процессов литейного производства: Тез. докл. респ. конф. - Ташкент, 1981, с. 55-56.

27. Трухов А.П., Ершов М.Ю. Неравномерность усадки и ее влияние на точность отливок. - Перспективы развития литейного производства и совершенствование технологических процессов литейного производства: Тез. докл. респ. конф. - Ташкент, 1981, с. 56-57.

28. Ершов М.Ю., Трухов А.П., Гупал А.А. Исследование неравномерности усадки длиномерных отливок. - Технология машиностроения для легкой и пищевой промышленности и бытовых приборов: Сб. / ЦНИИТЭИ легпищемаш, 1981, № 10, с. 6-9.

29. Штурмаков А.И., Трухов А.П., Шерман А.Д. Методика оценки предусадочного расширения отливок из серого чугуна от графитизации. - Депонир. науч. работы / ВИНТИ, 1982, № 2 (125), №Д670.

30. Штурмаков А.И., Трухов А.П., Шерман А.Д. Предусадочное расширение и усадочные дефекты в отливках из серого чугуна. - Депонир. науч. работы / ВИНТИ, 1982, №3 (125), №Д671.

31. Трухов А.П., Бычков Н.В. Механизм образования ужилин в сырых формах. - Известия вузов. Черная металлургия, 1982, №9, с. 124-128.

32. Трухов А.П. Математическая модель предусадочного расширения и линейной усадки отливок в сырых формах. - Литейное производство в автомобилестроении, 1982, вып. 1, с. 126-139.

33. Трухов А.П., Волкомич А.А., Сорокин Ю.А. Формирование, резервы и повышение точности отливок в сырых формах. - Литейное производство в автомобилестроении, 1982, вып. 2, с. 115-126.

34. Поведение сухой корки в сырой форме / А.П. Трухов, Н.В. Бычков, М.Ю. Чеботарев и др. - Прогрессивные технологические процессы в литейном производстве: Сб. / ОмПИ, 1982, с. 117-122.

35. Трухов А.П., Книпер С.В. Определение размеров нагреваемой оснастки. - Литейное производство, 1983, №6, с. 21-22.

36. Трухов А.П. Предусадочное расширение и качество чугунных отливок в сырых формах. - Тез. докл. II Всес. научно-техн. съезда литейщиков. - М.: 1983, с. 217-218.

37. Механизм образования трещин в безопочных формах в процессе заливки и затвердевания отливок / А.С. Горилей, А.П. Трухов, Л.П. Туманова и др. - Пути интенсификации технического перево-

зружения литейного производства и задачи повышения качества и снижения металлоемкости: Тез. докл. респ. конф. - Ташкент, 1984, 178-180.

38. Трухов А.П., Горилей А.С. Предусадочное расширение и усадка отливок и сплавов и методы их измерения. - Депонир. науч. работы/ВИНИТИ, 1984, № (155), № 1271 -тм.

39. Методика расчета размеров модельно-стержневой оснастки для САПР /А.П.Трухов, А.А.Волкомич, Ю.А.Сорокин и др. - Повышение качества фасонных отливок и экономия металла при их производстве: Тез. докл. Всес. конф. - М., 1984, с.106-107.

40. Образование трещин в безопочных формах после заливки /А.П.Трухов, С.Ф.Киян, А.С.Горилей и др. - Технология, оборудование, организация и экономика машиностроительного производства./ВНИИТЭМР, Сер.4. Технология литейного производства, - 1985, вып.5, с.14-28.

41. Влияние конструктивных параметров отливки на образование ужимин /А.П.Трухов, Ю.А.Сорокин, Н.В.Бычков и др. - Автомобильное производство: Сб./НИИНавтопром, 1985, №12, с.1-2.

42. Трухов А.П., Абылгазин Д.Д. Деформационная способность сырых уплотненных смесей и литейных форм. - Депонир. науч. работы /ВИНИТИ, 1986, №1 (171), №1527-тм.

43. Трухов А.П., Бычков Н.В., Чеботарев М.Ю. Механизм образования ужимин, разработка математической модели процесса и мероприятий по предотвращению ужимин. - Депонир. науч. работы /ВИНИТИ, 1986, №1 (171), № 1529-тм.

44. Тринчер В.К., Трухов А.П. Представления о растущем теле и их использование в литейном производстве. - Депонир. науч. работы/ВИНИТИ, 1986, №1 (171), № 1523-тм.

45. Трухов А.П., Ершов М.Ю., Абылгазин Д.Д. Исследование сил трения между отливкой и литейной формой. - Депонир. науч. работы/ВИНИТИ, 1986, № 2 (172), №1549-тм.

46. Трухов А.П., Тринчер В.К., Горилей А.С. Теоретические представления о механизме образования трещин в безопочных формах. - Депонир. науч. работы/ВИНИТИ, 1987, №1 (183), №1723-тм.

47. А.с. 530734 (СССР). Устройство для испытания литейных форм/ А.П.Трухов. - Оpubл. в Б.И., 1976, № 37.

48. А.с. 711726 (СССР). Устройство для испытания формовочных смесей / А.П.Трухов, Ю.А.Сорокин. - Оpubл. в Б.И., 1980, №3.

49. А.с. 819719 (СССР). Устройство для определения сил трения между отливкой и литейной формой/ М.Ю.Ершов, А.П.Трухов. -

50. А.с. 822974 (СССР). Способ изготовления литейных форм /А.П.Трухов, Н.В.Бычков. - Оpubл. в Б.И., 1981, № 15.

51. А.с. 822975 (СССР). Способ изготовления литейных форм /Н.В.Бычков, Ю.А.Сорокин, А.П.Трухов. - Оpubл. в Б.И., 1981, №15.

52. А.с. 963687 (СССР). Способ определения деформаций образца из смесей /С.В.Книпер, А.П.Трухов. - Оpubл. в Б.И., 1982, №37.

53. А.с. 986579 (СССР). Способ воздействия на ужиминообразование в отливках /А.П.Трухов, Н.В.Бычков. - Оpubл. в Б.И., 1983, №1.

54. А.с. 1225674 (СССР). Устройство для определения трещиностойчивости безопочных форм/ А.П.Трухов, А.С.Горилей, М.Ю.Ершов, Л.П.Туманов, В.М.Чикунов. - Оpubл. в Б.И., 1986, № 15.

55. А.с. 1250383 (СССР). Стопочная безопочная литейная форма/ В.М.Чикунов, А.П.Трухов, М.Ю.Ершов, Л.П.Туманова, А.С.Горилей. - Оpubл. в Б.И., 1986, №30.