

На правах рукописи

ЛАРИЧЕВ НИКОЛАЙ СЕРГЕЕВИЧ



**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ
ПОРИСТОСТИ ПРИ ЗАТРУДНЕННОЙ УСАДКЕ
И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПИТАЮЩИХ СИСТЕМ
ФАСОННЫХ ОТЛИВОК**

Специальность 05.16.04 – Литейное производство

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2019 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Коротченко Андрей Юрьевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор, Президент Российской ассоциации литейщиков, заместитель генерального директора открытого акционерного общества «НИИЛИТМАШ», г. Москва

Дибров Иван Андреевич

кандидат технических наук, Генеральный директор закрытого акционерного общества «Научно-Технический Центр «Авто-текс»

Буданов Евгений Николаевич

Ведущая организация:

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (АО «НПО «ЦНИИТМАШ»)

Защита диссертации состоится «15» мая 2019 в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного Совета Д 212.125.16 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д.3, аудитория № 523А.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Палтиевичу Андрею Романовичу и по электронной почте paltievichar@matl.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте <https://mai.ru/events/defence/>

Автореферат разослан «__» _____ 2019 года.

Ученый секретарь диссертационного Совета Д 212.125.16, к. т. н.

А.Р. Палтиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Служебные свойства отливки в той или иной степени формируются на всех этапах технологического цикла ее изготовления. Однако, одним из наиболее важных для формирования свойств отливки является этап затвердевания залитого сплава в форму. На этот этап влияет большое количество факторов, таких как характер затвердевания расплава, физико-химическое взаимодействие отливки с формой, геометрические размеры отливки и формы, теплофизические свойства формовочных материалов. Создание математической модели, учитывающей многообразие факторов связано с большими затруднениями.

На ряде этапов технологического процесса технолог имеет возможность контролировать свойства или вносить коррективы в ход процесса. Но при этом оказать непосредственное влияние на затвердевание он не может, и ему необходимы методики и модели, которые позволяют прогнозировать поведение расплава в форме и назначать параметры технологического процесса.

На служебные свойства отливок оказывают влияние большое количество факторов, среди которых можно выделить наличие внутренних несплошностей (поры, трещины). Для выявления причин образования этих дефектов в отливках и поиска средств их устранения литейщик-технолог использует программы компьютерного моделирования литейных процессов. Однако опыт применения специализированных пакетов программ свидетельствует о том, что проблему повышения плотности отливок не удается решить применяя математические модели с заложенными в них модельными упрощениями. Причиной этого являются сделанные допущения о факторах, влияющих на процесс затвердевания отливки.

Факторов, влияющих на образование пористости и трещин в теле отливки, много, среди них недостаточное питание тепловых узлов, выделение газов из сплава во время затвердевания, размыв формы, замешивание шлака и т.д. Кроме отдельного влияния факторов нельзя не учитывать их взаимного действия и сочетания. В качестве примера, в ряде работ показано, что наличие в теле отливки пористости приводит к увеличению деформированного состояния отливки. В последнее время появился ряд работ, в которых говорится об обратном влиянии на образование пористости – наличие затрудненной усадки, и что это влияние может быть значительным.

В современных расчетных методиках проектирования питающих систем отливок не учтено влияние затрудненной линейной усадки на образование внутренних несплошностей отливки. В результате, при отработке технологии на практике это может привести к появлению недопустимой усадочной пористости в условиях деформированного состояния отливки, которая может стать инициатором зарождения и развития горячих трещин.

Вопросами образования усадочных дефектов в разное время занимались П.Ф. Василевский, В.В. Назаратин, В.Г. Грузин, П.Н. Бидуля, П.Г. Новиков, В.В. Ширяев, В.Н. Савейко, Н.А. Трубицын, Б.Б. Гуляев, А.И. Вейник,

Г.Ф. Баландин, А.А. Рыжиков, Ю.А. Нехендзи, А.П. Смирнов, В.И. Кащенко и др.

В связи с вышеизложенным, актуальна задача проверки и исследования влияния деформированного состояния отливки на образование усадочной пористости и разработка решений, обеспечивающих повышение плотности отливок.

Цель работы: Исследование влияния деформированного состояния отливки в процессе затвердевания на формирование усадочной пористости и разработка методов расчета питающих систем с целью повышения плотности отливок.

Для реализации данной цели в работе поставлены следующие задачи исследований:

- установить взаимосвязь между плоским деформированным состоянием и процессами, происходящими во время затвердевания;
- экспериментально определить влияние затруднения усадки отливки на процесс формирования усадочных дефектов;
- разработать критерий образования усадочной пористости на основе уточнения математической модели формирования усадочной пористости в условиях затруднения свободной линейной усадки;
- разработать методику расчета питающих систем отливок с учетом затруднения свободной линейной усадки.

Методы исследований. В работе применялись экспериментальные и расчетные методы исследования: цифровая компьютерная томография, металлографические исследования, математическое моделирование исследуемых процессов.

Научная новизна:

1. Впервые установлена взаимосвязь между плоским деформированным состоянием и фильтрационными процессами, происходящими во время затвердевания. Предложено уточнение математической модели образования усадочной пористости, учитывающее действие фактора затрудненной усадки.

2. Установлена зависимость величины пористости от степени затруднения свободной линейной усадки при затвердевании сплава в литейной форме.

3. Разработан критерий пористости, позволяющий прогнозировать возможность формирования усадочной пористости при изменении ее деформированного состояния.

Положения, выносимые на защиту:

– учет выявленных в исследовании зависимостей между плоским деформированным состоянием и процессами, происходящими во время затвердевания, способствует установлению влияния фактора затрудненной усадки на процесс образования усадочной пористости;

– использование критерия образования усадочной пористости, разработанного на основе уточнения математической модели формирования усадочной пористости в условиях затруднения свободной линейной усадки, позволяет повысить точность прогноза появления усадочных дефектов в отливке;

– применение разработанной методики расчета питающих систем отливок с учетом затруднения свободной линейной усадки позволяет уменьшить количество усадочных дефектов в отливке и повысить качество отливок.

Практическая значимость:

Разработана методика определения коэффициентов локализации деформации в тепловых узлах фасонных отливок. Использование данной методики позволяет повысить точность расчетов питающих систем для отливок с несколькими тепловыми узлами в зоне действия затрудненной усадки.

Разработана методика расчета питающих систем отливок с учетом влияния затрудненной усадки на образование пористости для фасонных отливок, применение которой дает возможность повысить качество отливок за счет уменьшения количества усадочных дефектов в отливке.

Разработаны номограммы для определения размеров прибылей при разных значениях коэффициента локализации деформации в тепловом узле, использование которых позволяет сократить трудоемкость расчета прибылей.

Внедрение результатов диссертационной работы на «Воронежском механическом заводе» – филиале АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» позволило уменьшить на 10% количество усадочных дефектов в телах стальных отливок корпусных деталей ЖРД, сократить на 12% материальные затраты на изготовление оболочковых форм и снизить на 7% трудоемкость пост-обработки отливок за счет исключения операций разделки отливок и последующей заварки.

Разработанные по результатам исследований математические модели и методические указания к практическим занятиям, используются в учебном процессе на кафедре «Литейные технологии» ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Достоверность результатов проведенных исследований подтверждают:

- применение современной исследовательской техники;
- соответствие данных теоретических расчетов и результатов экспериментальных исследований;
- использование существующего математического аппарата, описывающего процессы затвердевания отливки в форме.

Личный вклад соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации, выражается в постановке цели работы, формулировке задач, планировании и организации исследований, разработке методик и проведении экспериментов, обработке и анализе полученных экспериментальных данных, а также в подготовке к публикации научных статей.

Апробация работы

- Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:
- Седьмой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», г Москва, 2014 г.;
 - Восьмой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», г. Москва 2015 г.;

- 3-й Международной конференции по компьютерной томографии, г. Москва, 2015 г.;
- 4-й Международных конференции по компьютерной томографии, г. Москва, 2016 г.;
- Научно-практической конференции «Новые технологии в литейном производстве», г. Балашиха, 2014 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, в том числе 5 в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 140 страницах, состоит из введения, 4 глав, общих выводов, библиографического списка из 106 наименований российских и зарубежных источников, 19 таблиц и 52 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность исследуемой проблемы, общая характеристика и цель работы, а также основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы литературные источники по классификации, факторам образования, математическим моделям и критериям формирования усадочной пористости.

В связи отсутствием в технической литературе единой однозначной классификации усадочных дефектов и четких границ типов пористости, предложено деление усадочной пористости на три размерных уровня, каждому из которых соответствуют дефекты определенного размера и методы их контроля: макро-, средний и микроуровни.

В результате рассмотрения факторов образования усадочных дефектов показано, что одним из факторов является деформированное состояние отливки, которое способно оказать значительное влияние на образование пористости. При этом на текущий момент приведены данные только по влиянию одноосно-деформированного состояния двухфазной зоны на затвердевание.

Из всех рассмотренных критериев образования усадочной пористости наиболее широкое применение получил критерий Нияма. Однако работы, проводимые на кафедре «Литейные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана, дают основание высказать утверждение, что разработанный А.Ю. Коротченко критерий пористости K_I позволяет получить более адекватные результаты при прогнозировании появления пористости.

На основании анализа литературных данных сформулирована цель и поставлены задачи исследований.

Во второй главе представлено теоретическое обоснование зависимостей процессов, происходящих при затвердевании, от деформированного состояния. Разработан критерий вклада деформации в образование усадочной пористости, учитывающий влияние затрудненной усадки. В математическую модель образования пористости внесены поправки для учета действия затрудненной усадки.

При затвердевании фасонных отливок, за счет их сложной геометрии в тепловом узле возникает более сложное деформированное состояние (ДС), чем одноосная деформация. Одним из вариантов ДС является плоское деформированное состояние (ПДС), с направлением деформаций перпендикулярно первичным осям дендритов.

Из рассмотрения малого объема двухфазной зоны, находящегося в ПДС, было получено выражение изменения доли твердой фазы в зависимости от величины деформации вдоль каждой из осей:

$$f_s \approx \frac{f_{s0}}{1 + \varepsilon_y + \varepsilon_z} = \frac{f_{s0}}{1 + \varepsilon_V^{ndc}} \quad (1)$$

где f_{s0} и f_s – доли твердой фазы до деформации и после; ε_y и ε_z – значения деформаций вдоль осей, перпендикулярных первичным осям дендритов; ε_V^{ndc} – величина объемной деформации при ПДС.

Наличие в отливке теплового узла в зоне действия затрудненной усадки приведет к локализации в нем деформация. Физический смысл локализации деформации заключается в том, что деформация с участка большей длины L_0 проявляется только в тепловом узле меньшего размера l_0 , т.е. величина деформаций возрастает в γ раз:

$$\gamma = \frac{L_0}{l_0} \quad (2)$$

Применение коэффициента локализации деформации позволяет связать геометрию отливки с возникающими в ней деформациями. При этом локализация деформаций возможна тогда, когда элементы, тормозящие свободную усадку, начинают затвердевать намного раньше узла локализации деформаций. В этом случае можно принять, что в течение всего процесса затвердевания действующая в узле локализации деформация имеет максимальное значение, равное увеличенной в γ раз линейной усадке, ε_l . Тогда изменение доли твердой фазы (1) приобретает вид:

$$f_s \approx \frac{f_{s0}}{1 + \gamma_V \frac{\beta}{3}} \quad (3)$$

где f_{s0} и f_s – доли твердой фазы до деформации и после; β – коэффициент объемной усадки; $\gamma_V = \gamma_y + \gamma_z$ – объемный коэффициент локализации деформации (ОКЛД).

Графики значения доли твердой фазы для разных коэффициентов затвердевания представлены на рис. 1 для случая равновесной кристаллизации.

Отличием от случая одноосной деформации является то, что изменение доли твердой фазы будет тем больше, чем больше деформация по второй оси.

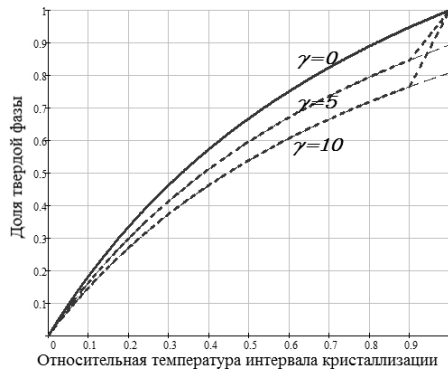


Рис.1. Графики изменения доли твердой фазы

Одним из процессов, имеющим место во время затвердевания и оказывающим значительное влияние на образование пористости, является течение расплава между ветвями дендритов. Большинство авторов связывают течение расплава в двухфазной зоне с перепадом давления согласно уравнению Дарси, а также предлагают выразить скорость течения из уравнения неразрывности. Расписав усредненное массовое течение по трем осям и выполнив ряд преобразований, имеем:

$$V_l = \beta V_T f_l + (\beta + 1) V_T \varepsilon_V^{ndc} (1 - \theta) \quad (4)$$

где β – коэффициент объемной усадки; $V_l = v_l f_l$ – усредненная скорость течения расплава; V_T – скорость затвердевания; f_l – доля жидкой фазы; ε_V^{ndc} – величина объемной деформации при ПДС; θ – относительная температура интервала кристаллизации.

В полученном уравнении первое слагаемое соответствует бездеформационному течению, второе слагаемое позволяет учитывать перемещение твердой фазы.

С учетом представления деформаций относительно осей OY и OZ как локализованной линейной усадки, получим зависимость скорости течения расплава в двухфазной зоне от локализации деформации:

$$V_l = \beta V_T f_l + \beta V_T \frac{\gamma_V (\beta + 1)}{3} (1 - \theta) \quad (5)$$

где β – коэффициент объемной усадки; V_T – скорость затвердевания; f_l – доля жидкой фазы; γ_V – объемный коэффициент локализации деформации; θ – относительная температура интервала кристаллизации.

Подставляя в уравнение (5) закон изменения доли твердой фазы от деформации при равновесной модели распределения доли твердой фазы по ширине двухфазной зоны, получим графики скорости течения расплава при разных значениях ОКЛД для отливок из сплавов системы Al-Si (рис. 2) и низкоуглеродистой стали (рис. 3).

Из графиков (рис. 2 и рис. 3) видно, что пятикратная локализация деформации способствует изменению скорости фильтрации почти в 3 раза. Таким образом, вклад затрудненной усадки в скорость течения расплава в двухфазной зоне является значительным, и его не учет может привести к серьезным расхождениям теоретических расчетов с практикой литья.

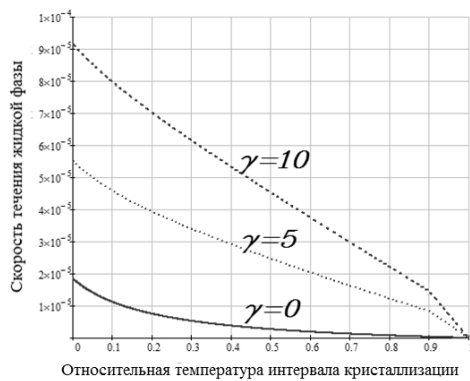


Рис.2. Графики скорости течения расплава при разных значениях ОКЛД для сплава системы Al-Si

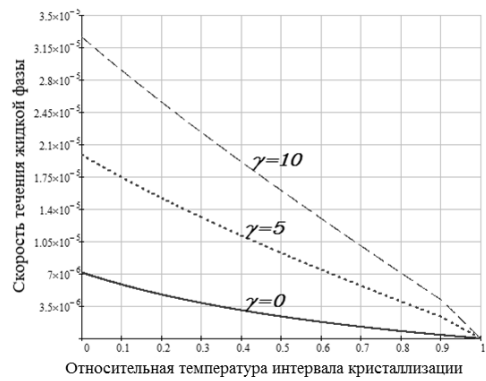


Рис.3. Графики скорости течения расплава при разных значениях ОКЛД для низкоуглеродистой стали

В связи с тем, что одной из причин образования пористости в отливке является потеря давления в двухфазной зоне, была произведена оценка влияние на него деформации. Для описания взаимосвязи течения расплава с падением давления в двухфазной зоне применяется уравнение Дарси. Подставив в него найденную скорость течения расплава, и приняв допущение о линейной зависимости коэффициента проницаемости от доли жидкой фазы, получим:

$$\Delta P = \frac{\mu\beta}{\alpha} V_T \Delta L \left(\theta + \frac{\gamma_V (\beta + 1)}{3} \int_0^\theta \frac{(1-\theta)}{f_l} d\theta \right) \quad (6)$$

где ΔP – перепад давления; μ – коэффициент динамической вязкости расплава; β – коэффициент объемной усадки; α – коэффициент пропорциональности проницаемости; V_T – скорость затвердевания; ΔL – ширина двухфазной зоны; θ – относительная температура интервала кристаллизации; γ_V – объемный коэффициент локализации деформации f_l – доля жидкой фазы.

Для наглядности, на рис. 4 представлены значения двух слагаемых переменной части уравнения (6), позволяющие оценить влияние деформации на потери давления в двухфазной зоне. Из графиков видно, что потери давления в двухфазной зоне увеличиваются с увеличением деформаций. При этом следует отметить, что падение давления от усадки и деформации равны при ОКЛД равном ~ 2 . Это значение соответствует нелокализованным деформациям по двум осям. Рост потерь давления может привести к остановке фильтрации, и, следовательно, увеличивается вероятность образования пористости.

После того, как была показана зависимость падения давления от затрудненной усадки, обратимся к вопросу критериальной оценки образования пористости. В результате интегрирования уравнения (6) по ширине двухфазной зоны, получим:

$$\sqrt{\frac{\Delta P_{LS} \alpha}{\mu\beta}} = K_1 \sqrt{1 + \frac{\gamma_V (\beta + 1)}{3} \int_0^1 \frac{(1-\theta)}{f_l} d\theta} \quad (7)$$

где ΔP – перепад давления; α – коэффициент пропорциональности проницаемости; μ – коэффициент динамической вязкости расплава; β – коэффициент объемной усадки; K_1 – критерий пористости; θ – относительная температура

интервала кристаллизации; γ_V – объемный коэффициент локализации деформации f_l – доля жидкой фазы.

Выражение в левой части уравнения (7) соответствует форме записи критерия K_I . Корень в правой части уравнения (7) является критерием вклада деформации в образование усадочной пористости.

Для расчета значения бездеформационного критерия K_I в современных пакетах программ компьютерного моделирования, используются математические модели, в которых не учитывается влияние деформации двухфазной зоны на затвердевание и образование пористости. Для учета этого влияния необходимо ввести критерий вклада деформации в образование усадочной пористости. Таким образом, форма записи критерия K_I соответствует деформационному критерию пористости, для расчета которого необходимо значение бездеформационного критерия увеличить на величину критерия вклада деформации в образование усадочной пористости:

$$K_1^{\partial} = K_1 \sqrt{1 + \frac{\gamma_V (\beta + 1)}{3} \int_0^1 \frac{(1 - \theta)}{f_l} d\theta} = K_n \cdot K_1 \quad (8)$$

где $K_n = \sqrt{1 + \frac{\gamma_V (\beta + 1)}{3} \int_0^1 \frac{(1 - \theta)}{f_l} d\theta}$ – критерий вклада деформации в образование усадочной пористости.

По формуле (8) получен график зависимости величины критерия вклада деформации в образование усадочной пористости от ОКЛД (рис. 5). Обратим внимание, что при наличии нелокализованной деформации ($\gamma_V = 1$) значение критерия пористости увеличивается на 20 %, а при $\gamma_V = 9$ – в два раза.

В полученной формуле (8) влияние двухосной деформации учтено в виде объемного коэффициента локализации деформации. Сведя двумерную задачу к одномерной, получили, что влияние двуосной деформации тем больше, чем больше деформации возникают вдоль второй оси.

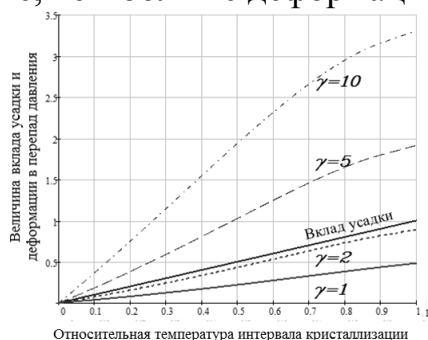


Рис.4. Графики вклада усадки и деформации в перепад давления

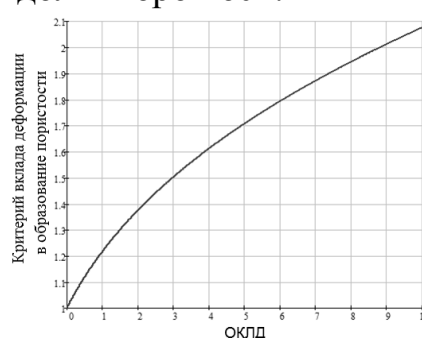


Рис.5. Зависимость критерия вклада деформации в образование пористости от ОКЛД

Для уточнения математической модели образования пористости с учетом ПДС было скорректировано математическое описание происходящих в отливке процессов.

В **третьей главе** определены зависимости величины пористости от коэффициента локализации деформации в тепловом узле. В результате прове-

дения исследования получены зависимости увеличения пористости от действия деформаций.

В качестве материала проб были выбраны широко используемые сплавы, обладающие большой линейной усадкой (не менее 2%). В качестве представителя черных сплавов выбрана сталь 20ГЛ ОСТ 32.183-2001, цветных – алюминиевый сплав АК7ч ГОСТ 1583-93. Разные по температурным интервалам, они имеют сходные проблемы, связанные с пористостью, и сходные пути их решения. Исследование одноосного затруднения линейной усадки проводилось на стали 20ГЛ и алюминиевом сплаве АК7ч; исследование двуосного затруднения – на сплаве АК7ч.

Для выбранных материалов были разработаны геометрии проб, исходя из того, чтобы тепловая картина в узле локализации деформации пробы для случая с затрудненной усадкой и без были идентичны.

Пробы на одноосную деформацию представляют собой брус и скобу с центральным утолщением типа теплового узла для локализации в нем деформаций. В отличие от бруса, у скобы имеются выступы, препятствующие свободной усадке. Основные размеры проб сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Основные размеры проб на одноосное затруднение

№	Материал пробы	Толщина, Т, мм	Размер теплового узла, D_T , мм	Длина свободного плеча бруса, L_T , мм	Длина плеча скобы, мм	Расстояние между полками скобы, мм	Коэф. локализ. деф.
1	АК7ч	15	40	90	–	–	0
2				–	75	190	4,75
3	Сталь 20ГЛ	15	40	90	–	–	0
4				–	40	120	3,0
5				–	60	160	4,0
6				–	90	220	5,5

Примечание: Знак «–» означает отсутствие соответствующего элемента.

Для проведения исследования двуосной деформации были разработаны пробы по форме типа «Иерусалимский крест» (рис. 6); основные размеры проб приведены в таблице 2.

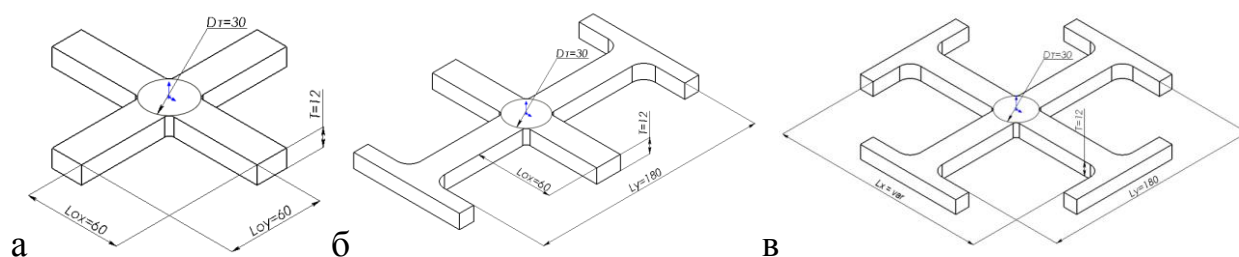


Рис.6. Конструкции проб для исследования влияния деформаций (а – без затрудненной усадки, проба №1; б – с одноосным затруднением усадки, проба № 2; в – с двуосной деформацией, проба №4)

Для проверки геометрии проб на равнозначные тепловые условия в тепловом узле, были выполнены расчеты затвердевания в пакете программ Flow-3D. Результаты расчетов показали, что тепловая картина для всех видов проб идентична.

Таблица 2. Основные размеры проб на двусное затруднение

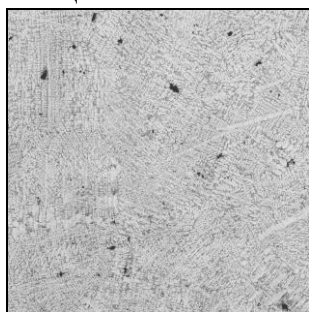
№	Толщина, Т, мм	Размер теплового узла, D_T , мм	Длина свободного луча креста, L_{ox}/L_{oy} , мм	Расстояние между перекадинами креста, L_x/L_y , мм	Коэф. локализ. деф.	Объемный коэф. локализ. деф.
1	12	30	60/60	-/-	0/0	0
2			60/-	-/180	0/6	6
3			-/-	120/180	4/6	10
4			-/-	180/180	6/6	12
5			-/-	240/180	8/6	14

Примечания:

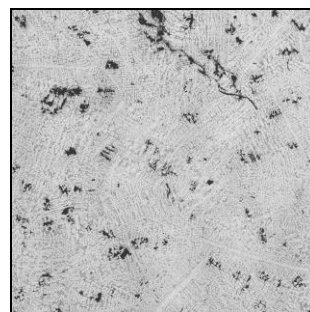
1. Через дробь написаны значения: первое – размер вдоль оси ОХ, второе – вдоль оси ОУ.
2. Знак «-» означает отсутствие соответствующего элемента.

Для проверки действия фактора затрудненной усадки были отлиты 3 пробы на одноосную деформацию из сплава АК7ч с одинаковым значением коэффициента локализации деформаций (4,75) в тепловом узле. Для определения влияния затрудненной усадки был рассчитан коэффициент увеличения пористости как отношение пористости образца, затвердевшего в условиях затруднения линейной усадки, к пористости образца со свободным затвердеванием. Результаты металлографического исследования (рис. 7) показали, что среднее значение коэффициента увеличения пористости составляет 4,495; максимальное отклонение пористости образцов из трех разных форм от среднего значения не превышает 5,4%. Таким образом, действие фактора было подтверждено.

Для определения зависимости величины усадочной пористости от действия затрудненной усадки, выраженной через объемный коэффициент локализации деформации, выполнено исследование проб на одноосную деформацию из стали 20ГЛ. Были отлиты 4 пробы с разным значением ОКЛД, согласно таблице 1.



Брус, пористость 0,433 %



Скоба, пористость 1,836 %

Рис.7. Результаты металлографического исследования (увеличение $\times 5$)

В пробах были выделены и исследованы два типа образцов. Первый тип образцов был вырезан из части пробы, затвердевающей в условиях торможения свободной линейной усадки; условно назовем его «питаемой» частью. Второй тип образцов вырезан из теплового узла, затвердевающего в условиях свободной линейной усадки; за счет большего приведенного размера этот тепловой узел будет затвердевать последним, а, следовательно, будет

являться «питающей» частью. Соответственно, в образцах «питаемой» части с увеличением величины затруднения усадки следует ожидать увеличения пористости, в «питающей» – уменьшения, за счет более раннего достижения критического перепада давления в первой и остановки фильтрационного течения.

Определение усадочных дефектов на образцах из «питаемой» части. Значение пористости пробы определялось как среднее арифметическое значений пористости двух шлифов, вырезанных соответствующей пробой. Результаты металлографического исследования сведены в таблицу 3, графики полученных зависимостей представлены на рис. 8. Установлено, что с увеличением коэффициента локализации деформации, величина пористости подчиняется экспоненциальному росту.

Таблица 3. Результаты металлографических исследований проб на одноосную деформацию

Параметр	Коэф. локализ. деф.			
	0	3	4	5,5
Пористость, %	1,067	2,061	3,756	4,956
Коэф. увеличения пористости	1,0	1,932	3,519	4,644

Так же проведено исследование «питающих» тепловых узлов рассмотренных проб методами компьютерной томографии. Результаты приведены в таблице 4. Анализ результатов исследования показал, что чем больше была деформация двухфазной зоны, тем раньше «отключалось» питание из теплового узла, и тем больше металла оставалось в нем, что приводит к уменьшению пористости.

Таблица 4. Результаты исследований на компьютерном томографе

Параметр	Коэф. локализ. деф.			
	0	3	4	5,5
Пористость, %	11,26	2,84	2,62	1,69

Выполнено исследование проб на двuosную деформацию, с разными значениями коэффициентов локализации деформаций по двум осям (согласно таблице 2), из сплава АК7ч. Для оценки влияния был рассчитан коэффициент увеличения пористости. Результаты обработки фотографий шлифов сведены в таблицу 5, графики полученных зависимостей представлены на рис. 9. Металлографическое исследование показало, что отливки затвердевали по дендритному механизму, а усадочные дефекты расположены между осей дендритов.

Из таблицы 5 видно, что пористость шлифа с максимальным затруднением линейной усадки меньше предыдущего значения из-за появления трещины и снятия напряжений в тепловом узле.

Таблица 5. Результаты исследований проб с двuosной деформацией

Параметр	Коэф. локализ. деф.				
	0	6	10	12	14
Пористость, %	2,775	3,211	5,215	6,296	5,958
Коэф. увеличения пористости	1,0	1,157	1,879	2,269	2,147

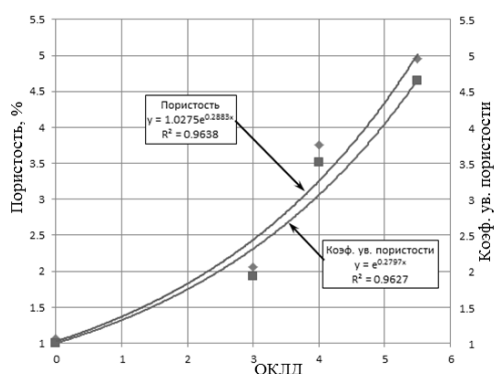


Рис.8. Графики зависимости величины усадочной пористости и коэф. увеличения пористости от ОКЛД

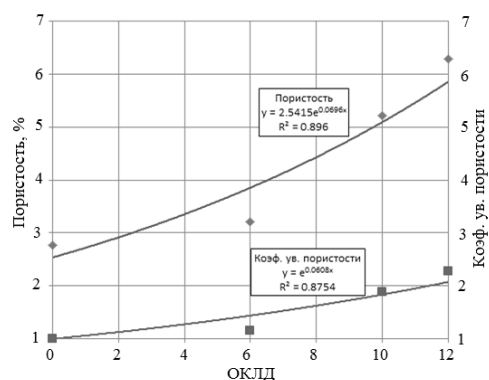


Рис.9. Графики зависимости величины усадочной пористости и коэф. увеличения пористости от ОКЛД

Исследование на компьютерном томографе показало, что выделить преимущественную ориентацию дефектов не представляется возможным ввиду их разнонаправленной ориентации. При этом четко прослеживается междендритный характер их расположения, а так же то, что с увеличением ОКЛД габариты облака расположения дефектов также увеличиваются.

В результате проведенных исследований получены зависимости пористости и коэффициента увеличения пористости для стали 20ГЛ и алюминиевого сплава АК7ч для теплового узла с приведенным размером 0,6 см (таблица 6).

Таблица 6. Полученные зависимости пористости

	Сталь 20 ГЛ	АК7ч
Пористость	$P = 1,0275e^{0.288\gamma_V}$	$P = 2,542e^{0.0698\gamma_V}$
Коэф. увеличения пористости	$KП = e^{0.28\gamma_V}$	$KП = e^{0.0608\gamma_V}$

В четвертой главе представлены разработка методики расчета прибылей и особенности расчета затвердевания для фасонных отливок.

На основании разработанной теории была предложена корректировка методик расчета габаритов прибылей, достаточных для устранения влияния затрудненной усадки. Для корректировки приняты методы расчета прибылей Й. Пржибыла и Василевского-Назаратина.

В качестве примера выполнен расчет прибылей для стальной пробы № 6 Скоба (таблица 1). Исходными данными является объем рассматриваемого теплового узла. В данном случае объем теплового узла равен: $V_0 = 55\,500\text{ мм}^3$. Коэффициент объемной усадки для углеродистой стали примем равным $\beta = 0,05$.

По расчетным формулам получены размеры прибылей для двух методов расчета, без учета действия затрудненной усадки и с ним, и сведены в таблицу 7.

Моделирование работы прибылей выполнено для стандартных и скорректированных прибылей (рис. 10, с целью сокращения иллюстративного материала на рис. показаны результаты моделирования прибылей по Василевскому-Назаратину). Из распределения значений критерия пористости K_I сле-

дует, что для стандартной прибыли область вероятного образования усадочные дефекты выходит в тело отливки, а для увеличенной – нет.

Таблица 7. Результаты расчетов размеров прибылей

Метод расчета (форма прибыли)	Пржибыл (цилиндр)		Василевский-Назаратин (цилиндр)	
	–	+	–	+
Учет деформации	–	+	–	+
Объем прибыли, мм ³	37 000	92 500	18 330	69 375
Диаметр прибыли, мм	33,5	45,5	26,5	41,3
Высота прибыли, мм	41,9	56,9	33,2	51,7
Приведенный размер прибыли, мм	6,98	9,48	5,53	8,61

Таким образом, скорректированная методика расчета прибылей позволила рассчитать габариты прибылей, достаточных для получения плотной стальной пробы.

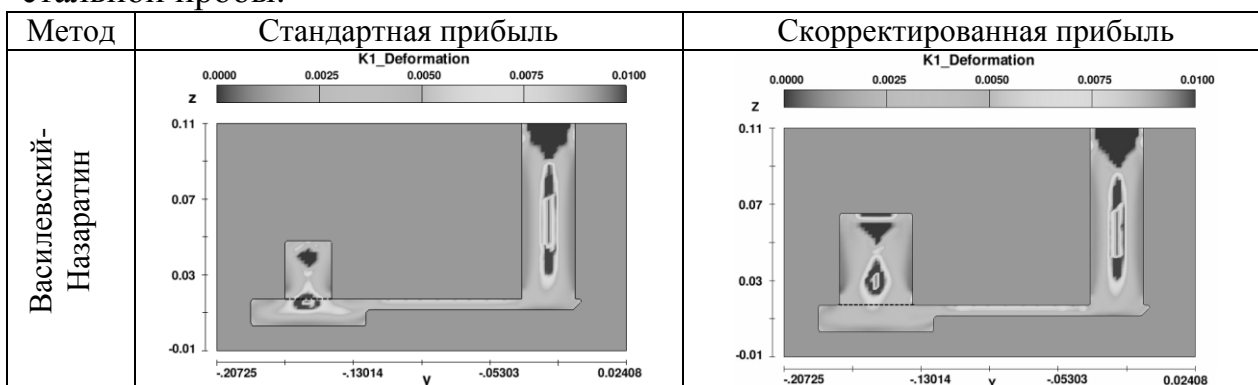


Рис.10. Распределение значений критерия пористости K_1 с учетом действия затрудненной линейной усадки

скорректированная прибыль (пунктиром показана граница отливка-прибыль).

Расчет прибыли для алюминиевого сплава проведен для пробы типа «иерусалимский крест».

Исходными данными является объем центрального теплового узла, $V_0 = 38\,500\text{ мм}^3$. Коэффициент объемной усадки для сплава АК7ч примем равным $\beta = 0,05$. По расчетным формулам получены размеры прибылей для коэффициента прибыли $K_n = 6,0$ без учета деформации и с ее учетом, и сведены в таблицу 8.

Таблица 8. Результаты расчетов размеров прибылей

Метод расчета	Без учета деформации	С учетом деформации
Объем прибыли, V_{np} , мм ³	16 500	71 500
Диаметр прибыли, $2 \cdot R_{np}$, мм	28,0	46,0
Высота прибыли, H_{np} , мм	35,0	57,0

Для проверки работы прибылей проведен натурный эксперимент. Отлитые пробы с прибылями были порезаны по центральной оси прибыли и сделаны темплеты.

На темплете пробы со стандартной прибылью раковина выходит на внешнюю часть прибыли, и вся поверхность темплета поражена усадочной пористостью. Процент пористости в теле отливки – 1,49 %, что соответствует 4 баллу пористости (ГОСТ 1583-93). На темплете с увеличенной прибылью усадочная раковина выведена в прибыль, а в отливке наблюдается незначи-

тельная усадочная пористость. Процент пористости в теле отливки – 0,66%, что соответствует 3 баллу пористости (ГОСТ 1583-93).

Таким образом, скорректированная методика расчета прибылей позволила рассчитать габариты прибыли, достаточной для получения плотной алюминиевой отливки.

В отличие от рассмотренных проб, при затвердевании фасонных отливок за счет их более сложной геометрии, в области действия затрудненной усадки возможно нахождение нескольких тепловых узлов. Необходимо определить, какая часть усадочных деформаций будет реализована в каком из тепловых узлов. Для этого была разработана методика определения значений коэффициентов локализации деформации в тепловых узлах фасонных отливок и получены выражения для расчета этих коэффициентов при разном взаимном расположении тепловых узлов.

Показано, что одним из способов борьбы с усадочными дефектами является распределение локализованной в одном тепловом узле усадки на несколько других. Для реализации этого метода необходимо в зоне действия затрудненной усадки создать дополнительные тепловые узлы. Расчеты показали, что предложенный метод позволил устранить усадочные дефекты из тела отливки и уменьшить суммарный объем применяемых прибылей.

Рассмотрим затвердевание отливки балка надрессорная из стали 20ГЛ и покажем критериальную оценку образования усадочных дефектов. Отливка имеет коробчатое сечение. Одной из причин брака является горячая трещина по верхнему поясу отливки, которая появляется в тепловом узле №1 (рис. 11). При этом в нижнем поясе горячая трещина отсутствует (тепловой узел №2, рис. 11). Инициатором зарождения и развития горячей трещины наиболее вероятно является усадочная пористость, образующаяся в тепловом узле.

Моделирование затвердевания балки выполнено в пакете программ Flow-3D. Результаты расчета критерия пористости K_I представлены на рис. 12. Из результатов расчета бездеформационного критерия пористости (рис. 12,а) следует, что пористость ни в одном из тепловых узлов не образуется.

По разработанной методике были рассчитаны критерии вклада деформации в образование пористости для двух тепловых узлов: $K_n^{m.y.1} = 1,59$; $K_n^{m.y.2} = 1,70$. Введение полученных критериев (рис. 12,б) показывает, что в верхнем тепловом узле созданы условия для формирования усадочной пористости, которая будет инициатором трещинообразования в верхнем поясе отливки.

Расчет образования усадочных дефектов в отливке типа рама боковая

Рассмотрим затвердевание отливки рама боковая из стали 20ГЛ. Отливка имеет коробчатое сечение. Одним из проблемных мест является R55, в котором усадочная пористость служит очагом зарождения трещин (рис. 13).

Значения критериев вклада деформации в образование пористости рассчитаны согласно разработанной методике: $K_n^{m.y.1} = 1,76$; $K_n^{m.y.2} = 1,76$.

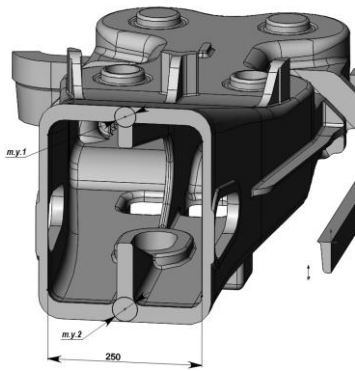


Рис. 11. Расположение тепловых узлов в сечении отливки балка надрессорная

Для проверки работы прибылей выполнено моделирование затвердевания отливок с обычной и увеличенной прибылями по методу Василевско-Назаратина. Результаты представлены на рис. 14. Темным цветом выделены области вероятного расположения усадочных дефектов (выше критического значения критерия пористости).

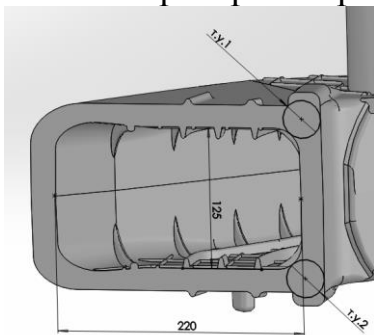


Рис.13. Расположение тепловых узлов в сечении R55

Из результатов расчета рамы с бездеформационной прибылью следует, что пористость в верхнем тепловом узле образуется. При этом расчет с увеличенной прибылью показал, что в верхнем тепловом узле усадочный дефект устранен.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Теоретический анализ позволил установить взаимосвязь между плоским деформированным состоянием и фильтрационными процессами, происходящими во время затвердевания, такими как изменения доли твердой фазы, скоростью течения расплава и падения давления в двухфазной зоне, в зависимости от величины коэффициента объемной локализации деформации. Многократная локализация деформации способствует существенным изменениям скорости фильтрации и перепада давления, что может привести к более ранней остановке фильтрационного течения и увеличению пористости в отливке. Максимальное влияние оказывается на тепловой узел, в котором происходит локализация деформаций.

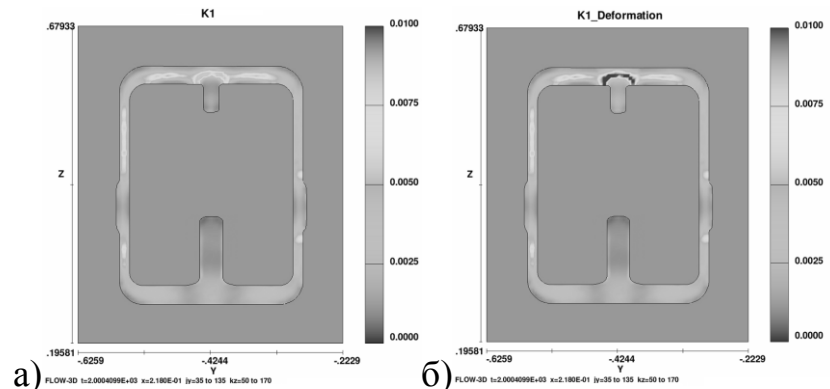


Рис.12. Результаты моделирования отливки балка надрессорная: а) значения бездеформационного критерия K_1 ; б) значения критерия пористости K_1 с учетом влияния деформации

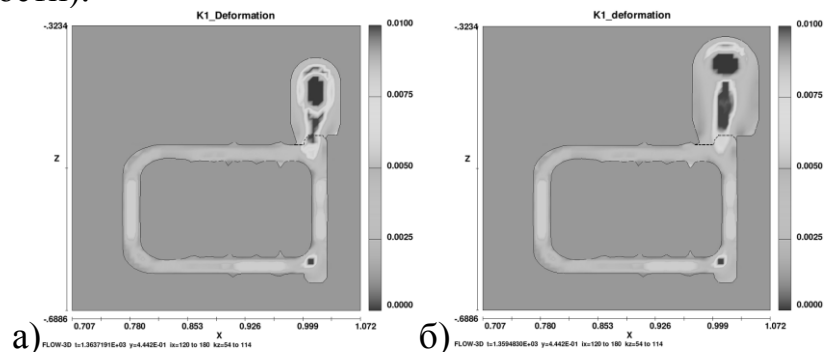


Рис.14. Результаты моделирования R55 рамы боковой: а) стандартная прибыль; б) скорректированная прибыль

2. На основе экспериментальных данных определено влияния одно- и двусосного деформированного состояния отливки на формирование усадочной пористости. Установлено, что изменение значения пористости в тепловом узле при равных значениях коэффициента локализации деформации зависит от геометрии рассматриваемых тепловых узлов. Получены зависимости коэффициента увеличения пористости от величины локализации усадки.
3. Разработан критерий образования усадочной пористости K_1^D на основе уточнения математической модели формирования усадочной пористости в условиях затруднения свободной линейной усадки, позволяющий учитывать воздействие затрудненной двусосной деформации. Установлено, что при проведении компьютерного моделирования процесса затвердевания, влияние затрудненной усадки возможно учесть путем введения поправки к критерию пористости.
4. Проведенные расчеты показали, что скорректированные методики расчета прибылей с учетом действия затрудненной усадки на процесс затвердевания, позволяют уменьшить пористость в стальных и алюминиевых пробах.
5. Разработана методика расчета коэффициентов локализации деформации для нескольких тепловых узлов, расположенных в области действия затрудненной усадки. На основании разработанной методики расчета предложен метод уменьшения усадочной пористости путем распределения затрудненной усадки на несколько тепловых узлов.
6. Выполнено, с учетом поправок к критерию пористости, компьютерное моделирование затвердевания отливок типа балка надпрессорная и рама боковая, которое показало совпадение рассчитанных зон образования усадочных дефектов в отливках под действием затрудненной усадки с заводской практикой литья.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Ларичев Н.С., Коротченко А.Ю., Куца А.Ю. Оценка влияния затрудненной усадки на образование пористости в отливках // Литейное производство. 2016. № 7. С. 10-15. (0,4 п.л. / 0,35 п.л.)
2. Классификация и методы контроля внутренних усадочных дефектов / Н.С. Ларичев [и др.] // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана Эл № ФС 77-48211. 2016. № 5. С. 1-13. (0,8 п.л. / 0,7 п.л.)
3. Ларичев Н.С. Влияние деформированного состояния на расчет пористости в отливках. // Литейщик России. 2015. № 10. С. 39-43. (0,3 п.л.)
4. Коротченко А.Ю., Смыков А.Ф., Ларичев Н.С. Новый метод единства реологических моделей для решения задач по технологии литья // Литейное производство. 2015. № 3. С. 12-16. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)
5. Влияние условий заливки на формирование служебных свойств отливки «рама боковая» / Н.С. Ларичев [и др.] // Литейщик России. 2014. № 3. С. 40-43. (0,25 п.л. / 0,1 п.л.)
6. Оптимизация конструкции литниково-питающей системы компьютерным моделированием / Н.С. Ларичев [и др.] // Литейное производство. 2012. № 12. С. 019-021. (0,2 п.л. / 0,19 п.л.)