

На правах рукописи



ЗАРУБИНА ОЛЬГА АЛЕКСАНДРОВНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ СИЛУМИНОВ
ПО КАНАЛАМ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФОРМЫ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОТЛИВКИ ОКСИДНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ**

Специальность 2.6.3. – Литейное производство

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2021г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) на кафедре «Литейные технологии»

Научный руководитель:

-Коротченко Андрей Юрьевич,

доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты:

-Изотов Владимир Анатольевич,

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

-Буданов Евгений Николаевич,

кандидат технических наук, ЗАО «Научно-Технический Центр «Автотекс», генеральный директор, г. Москва

Ведущая организация:

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

Защита диссертации «06» октября 2021 года в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.327.05 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 и по электронной почте paltievichar@mati.ru.

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

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
24.2.327.05, к.т.н., доцент



Палтиевич А.Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы:

Одними из главных направлений развития отечественного литейного производства остаются:

- повышение производительности труда;
- снижение материальных и энергетических затрат;
- повышение служебных характеристик отливок;
- сокращение сроков и затрат на освоение технологии производства литых деталей;
- уменьшение вредного воздействия на окружающую среду, в том числе и путем снижения брака отливок.

Достижение таких результатов без повышения точности расчета основных параметров технологического процесса невозможно.

Несмотря на то, что в последнее время большое развитие получили новые технологии изготовления литых заготовок и деталей, дальнейшее изучение традиционных способов литья не теряет своей актуальности. Так объем выпуска отливок литьем в кокиль до настоящего времени имеет значительную долю и в последние годы она составляла ~4,2...5,0% от общего объема производства отливок в России.

Широкое использование литья в кокиль в промышленности, прежде всего, обусловлено такими его преимуществами, как малооперационность, относительно высокая размерная точность и качество поверхности отливок. Этот процесс обеспечивает более широкие, чем при литье в песчаные формы, возможности по управлению макро и микроструктурой материала отливок, увеличение производительности процесса. Кроме того, по такому показателю, как выпуск продукции с единицы производственной площади процесс изготовления отливок литьем в кокиль является одним из лидеров при любой серийности производства.

Наряду с указанными преимуществами данный процесс по сравнению, например, с литьем под давлением имеет существенно более низкие показатели по коэффициенту использования металла ($K_{им}$), а также точности массы ($K_{тм}$). Его недостатки проявляются тем существеннее, чем иррациональнее выполнена литейная система (ЛС) и определены другие технологические параметры, отвечающие за качество готового продукта. Вместе с тем, непростой задачей при литье в кокиль является получение отливок из алюминиевых сплавов с высокими прочностными характеристиками. Одна из основных причин этого обусловлена склонностью данных сплавов к окислению. Во многих случаях даже применение рафинирования и модифицирования расплава перед заливкой, использование в каналах ЛС современных керамических фильтров различных типов не приводит к желаемому результату.

Приведенные данные указывают на необходимость такой организации процесса, при которой сокращается интенсивность окисления расплава в форме и ве-

роятность сосредоточения продуктов окисления в местах, отвечающих за служебные свойства отливки в целом.

Существенное сокращение поиска оптимального варианта технологического процесса, в том числе и новых вариантов его реализации, возможно путем использования современных средств вычислительной техники. Это обуславливает важность развития этих методов и поиска критериев для количественной оценки результатов моделирования процесса заливки, разрабатываемой оснастки. Известные критерии для такой оценки, например, степени загрязненности материала отливки оксидами, по результатам числительных экспериментов, такую возможность обеспечивают не в полной мере.

В связи с этим, совершенствование средств, предназначенных для исследования процессов, происходящих в каналах ЛС, и формообразующей полости формы при ее заливке путем использования компьютерного моделирования, а также разработка критериев для количественной оценки результатов вычислительных экспериментов является актуальной задачей.

Цель работы: повышение механических свойств литых деталей и заготовок из алюминиевых сплавов при литье в кокиль, путем минимизации образования оксидных включений в каналах и формообразующих полостях литейной формы и создания условий для такого их распределения по объему расплава, которое бы способствовало повышению служебных свойств отливок в целом.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих основных **задач:**

1. разработать критерий оценки вероятной степени загрязненности отливки оксидными включениями при использовании численного моделирования. И показать возможности его применения;
2. установить реологические характеристики сплава АК9 определяющие поведение расплава в формообразующей полости при ее гравитационном заполнении;
3. исследовать особенности процесса окисления расплава в газонепроницаемой оснастке при использовании нижнего и верхнего подвода и предложить элементы литниковой системы и другие решения, способствующие уменьшению содержания оксидных плен и их фрагментов в теле отливки или ее наиболее ответственных частях.

Научная новизна работы:

1. Разработаны методы снижения загрязненности отливок оксидными включениями, предусматривающие оценку степени поражения расплава оксидами, вероятности их перераспределения по объему отливки и средства, обеспечивающие сосредоточение оксидных включений в литниковой системе или ненагруженных частях отливки;
2. Разработана методика определения параметров реологической модели расплава в температурном интервале его кристаллизации на начальном этапе

формирования связанной структуры путем использования стандартной спиральной пробы на жидкотекучесть;

3. Для оценки степени загрязненности отливок оксидными включениями предложен критерий, учитывающий изменение площади свободной поверхности расплава при заполнении литейной формы, температуру заливки расплава и компонентный состав сплава.

Практическая значимость:

Оптимизация технологии изготовления отливок из алюминиевых сплавов с использованием коэффициента загрязненности металла, позволяет повысить точность расчетов литниковых систем и прогнозирования загрязненности отливок оксидными включениями.

Моделированием процесса заливки подтверждено то, что при заполнении кокилей *Al-Si-Mg* сплавами наиболее интенсивное образование оксидных плен на свободной поверхности расплава и их замешивание происходит на начальном этапе заполнения, когда возмущенность потока расплава в каналах формы, включая литниковую чашу, и концентрация кислорода и кислородосодержащих продуктов в ее полостях максимальны;

При использовании нижних и боковых литниковых систем управление скоростью расплава в питателе на начальном этапе заполнения формы и содержанием неметаллических включений в кокильных отливках возможно путем использования промывников, соединенных с коллектором через дроссель;

При использовании верхних литниковых систем для высоконагруженных массивных отливок из алюминиевых сплавов управление их загрязненностью оксидами и, следовательно, пористостью возможно путем сосредоточения плен и фрагментов таких включений в промывниках или частях отливки не оказывающих существенного влияния на служебные свойства литого изделия;

Использование результатов диссертационной работы на предприятии АО «Электросетьстройпроект» существенно сократило сроки доводки техпроцессов изготовления высоконагруженных кокильных отливок из алюминиевых сплавов и обеспечило их служебные характеристики при повышении $K_{им}$ в 1,5...3,3 раза.

Результаты выполненных в работе исследований в виде алгоритма анализа итогов численного моделирования работы литниковых систем и методических указаний к практическим занятиям используются в учебном процессе на кафедре «Литейные технологии» ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана в дисциплине «Автоматизированное проектирование технологии литья», при выполнении курсовых научно-исследовательских работ и проектов, подготовке выпускных квалификационных работ бакалавров, магистров и специалистов.

Методология и методы исследования.

Работа выполнена с применением программ, позволяющих осуществлять компьютерное моделирование литейных процессов (FLOW 3D и ProCAST). Статистическая обработка результатов проводилась с применением стандартного па-

кета анализа данных в программе MS Excel. Химический состав сплава контролировался с помощью эмиссионного спектрометра «АРГОН-5», обеспечивающего автоматическое измерение спектров с занесением их в базу данных и последующую обработку результатов. Температура кокиля контролировалась оптическим пирометром, а расплава системой управления плавильно-раздаточной печи. Шлифы для определения пористости отливок подготавливались с использованием электроэрозионной обработки и шлифовально-полировального станка для шлифов 3881 “NERIS” в соответствии с ГОСТ 1583-93. Пористость оценивалась путем использования оптического микроскопа Neophot и сравнением шлифов с эталонами.

Основные положения, которые выносятся на защиту:

- применение разработанных методов снижения загрязненности отливок оксидными включениями, предусматривающих оценку степени поражения расплава оксидами и вероятности их перераспределения по объему отливки, использование средств для сосредоточения оксидов в литниковой системе или ненагруженных частях отливки, обеспечивают прогнозирование характера поражения сплава продуктами окисления и, следовательно, служебных свойств литого изделия в целом;
- Предложенная реологическая модель и установленные параметры этой модели на начальном этапе формирования связанной структуры в расплаве, находящегося в температурном интервале кристаллизации, обеспечивают применимость разработанных методов снижения содержания оксидных включений в отливках, в том числе, и при таких условиях, когда кристаллизация расплава начинается на этапе заполнения формообразующей полости;
- использование критерия загрязненности металла оксидными включениями, позволяет повысить точность прогнозирования загрязненности материала отливки оксидными пленками и их фрагментами, а также их распределения по объему расплава.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных методов исследований, анализа и статистической обработки экспериментальных данных, подтвержденных сравнительным анализом численных и натуральных экспериментов, а также практическим использованием результатов при разработке технологических процессов.

Личный вклад соискателя выражается в планировании, организации и проведении экспериментальных исследований, обработке, анализе и интерпретации полученных результатов.

Апробация работы. Основные материалы диссертационной работы обсуждались на IX Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроение России» (Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 5 -8 октября 2016 г.), X Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Буду-

щее машиностроение России» (Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 25 -28 сентября 2017 г.), XII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроение России» (Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 25 -28 сентября 2019 г.), Международная научно-практическая конференция «Материаловедение и металлургические технологии II» (Челябинск, Южно-Уральский государственный университет, 1-3 октября 2019 г.)

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 14 научных работ, 10 из них [1–10] в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и одна [11] в издании, индексируемом в международных системах цитирования Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов, библиографического списка из 120 наименований и приложений. Она изложена на 153 страницах машинописного текста, содержит 6 таблиц и 108 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность решаемой научно-технической проблемы повышения при литье в кокиль механических свойств литых деталей и заготовок из алюминиевых сплавов, формулируется цель и ставятся задачи исследований, излагается научная новизна и практическая ценность работы, формулируются основные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ литературных данных по вопросам зависимости механических свойств отливок от степени загрязненности их материала оксидными включениями. Рассмотрены факторы, влияющие на характер течения расплава в каналах литейной формы и ее формообразующей полости, оказывающих существенное влияние на кинетику окислительных процессов. Показаны преимущества и недостатки использования нижних, боковых и верхних ЛС при получении деталей и заготовок из алюминиевых сплавов литьем в кокиль. Проанализированы существующие представления о реологических свойствах сплавов, определяющих характер заполнения каналов и полостей литейной формы и, следовательно, влияющих на развитие окислительных процессов в них. Рассмотрены известные критерии и методики оценки вероятности загрязнения отливки оксидными включениями, проанализированы их преимущества и недостатки.

При изготовлении нагруженных отливок в электротехнической и других отраслях промышленности широко используется силумин АК9. Данный материал обладает высокой твердостью, жаропрочностью, средней коррозионной стойкостью. Его механические свойства могут быть существенно повышены путем термической обработки. Это послужило одной из основных причин выбора отливок из этого материала в качестве объекта исследования.

На основании результатов литературного обзора и анализа данных сформулированы цели и задачи исследований, выполненных в работе.

Во второй главе разработан критерий K_{OF} загрязненности металла оксидными включениями, позволяющий прогнозировать степень поражения отливки оксидными пленами и их фрагментами по результатам численного моделирования заливки формы. Доказана возможность его применения путем сравнительного анализа результатов численных экспериментов, выполненных в работе, с результатами натуральных исследований М.В. Шарова и Н.М. Галдина. Оценено максимально возможное количество оксидов, образующихся в каналах и полостях металлической (газонепроницаемой) литейной формы при ее заполнении алюминиевым сплавом. Выявлены реологические свойства доэвтектического силумина находящегося в интервале кристаллизации и имеющего разрушенную структуру.

Предлагаемый критерий K_{OF} рассчитывается по следующей зависимости:

$$K_{OF} = \frac{\int_0^{t_{зан}} F_{SR}(t) dt \cdot h_p}{t_{зан} \cdot V_o} \cdot k_T \cdot k_K, \quad (1.1)$$

где F_{SR} – текущая расчетная площадь свободной поверхности расплава;

$t_{зан}$ – продолжительность заполнения формы;

h_p – средняя толщина оксидной пленки;

V_o – объем отливки;

k_T – коэффициент, учитывающий температуру заливки расплава;

k_K – коэффициент, учитывающий компонентный состав сплава.

При этом площадь свободной поверхности расплава F_{SR} определяется при моделировании заполнения формы с помощью программы FLOW 3D или ProCAST.

Для подтверждения возможности применения предлагаемого критерия выполнен сравнительный анализ результатов численного моделирования (с оценкой загрязненности отливки оксидными включениями с помощью критерия K_{OF}) и данных натуральных экспериментов, полученных профессором М.В. Шаровым и Н.М. Галдиным (с оценкой загрязненности отливки путем определения отношения суммарной площади проекций включений, выявленных рентгеноскопией к общей площади рабочей части пробы).

Моделирование процесса заполнения осуществлялось на пробе представленной на рисунке 2. Результаты исследований представлены на рисунке 3.

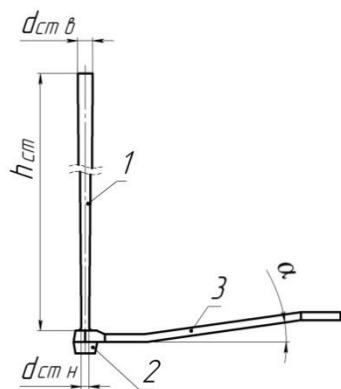


Рисунок 2 — Эскиз системы для исследования режимов течения металла: 1—стояк; 2—зумпф; 3— контрольная проба; $d_{ст.в}$, $d_{ст.н}$, $h_{ст}$ — диаметр верхнего и нижнего поперечного сечения стояка и его высота, соответственно

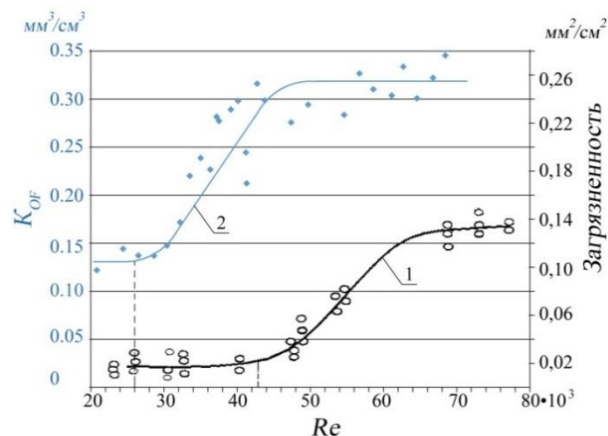


Рисунок 3 – Результаты исследований заполнения формы: 1 – натурный эксперимент; 2 – численный эксперимент

Из рисунка 3 видно, что оценка загрязненности посредством критерия K_{OF} качественно совпадает с результатами натурального эксперимента. Количественное расхождение (критическое значение числа Re при натурном эксперименте— 43500, а при численном— 26000) можно объяснить, прежде всего тем, что в натуральных экспериментах, после полного заполнения пробы, формообразующая полость промывалась дополнительным объемом расплава, а также, вероятным неполным соответствием геометрии модели технологической пробы, использованной в численном эксперименте и пробы М.В. Шарова и Н.М. Галдина.

Оценка возможного объема оксидов, образующихся в рабочей полости формы при ее заполнении, была выполнена с учётом следующих допущений:

- в рабочей полости содержится только воздух при температуре формы 573K и в реакции окисления принимает участие весь его начальный объем (отсутствует подсос воздуха, он не покидает форму через вентиляционную систему и другие элементы соединяющие формообразующую полость кокиля с атмосферой);

- окислительные процессы на поверхности расплава происходят только между Al- и O_2 ,-содержащимися в форме (не учитываются другие кислородосодержащие вещества и окисляемые компоненты расплава), по формуле $4Al + 3O_2 = 2Al_2O_3$.

Результат расчетов показал, что 1 см³ объема рабочей полости формы при контакте с расплавом может образовать до $8,33 \cdot 10^{-5}$ см³ Al_2O_3 , то есть объем менее 0,01% объема отливки. Вместе с тем, в зависимости от условий протекания окислительных процессов (температура, химический состав сплава, скорость обновления свободной поверхности расплава в форме и др.) толщина оксидной пленки согласно литературным данным может изменяться от 0,1 до 5 мкм, при этом площадь ее поверхности может изменяться от 833 до 16,6 см², соответственно. Очевидно, что наличие окислов с такой поверхностью в материале отливки может оказывать существенное влияние на условия питания ее затвердевающих частей.

Было установлено, что в случае когда кристаллизация отливки начинается до полного заполнения рабочей полости формы численное исследование течения расплава возможно путем применения упруго–вязко–пластической модели Ньютона | Прандтля ($N | P$).

Зависимость вязкости сплава от температуры, применяемая в этой модели, установлена по результатам литературного обзора и представлена на рисунке 4.

Для модуля упругого последействия G приняли допущение, что он соответствует модулю упругого последействия G_2 определенному Л.П. Каширцевым (рисунок 5).

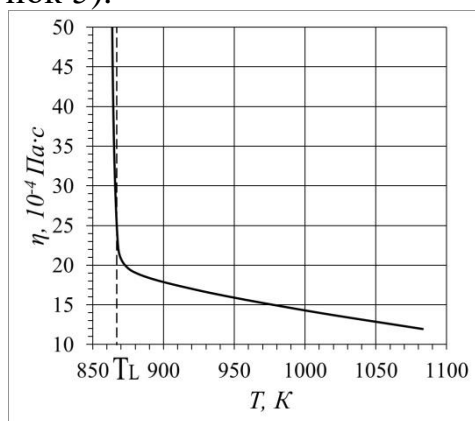


Рисунок 4 – Зависимость динамического коэффициента вязкости η сплава АК9 от температуры

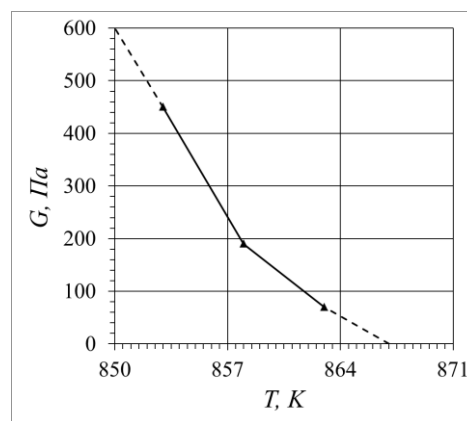


Рисунок 5 – Зависимость модуля упругого последействия сплава АК9 от температуры

Значение пластичности (предельного напряжения сдвига τ_s) сплава АК9, при котором происходит остановка потока, установлено путем проведения численных экспериментов с использованием пробы на жидкотекучесть.

Методика проведения и технологические параметры эксперимента принимались согласно ГОСТ 16438-70.

При определении пластических свойств расплава были сделаны следующие допущения:

- температура начала проявления этих свойств соответствует 15% доли твердой фазы;

- зависимость $\tau_s = f(T)$ носит линейный характер;

- остановка потока происходит при температуре $T_{оп}$ соответствующей 20% доли твердой фазы (остановка сплава АК9 в спиральной пробе на жидкотекучесть при заливке в кокиль по данным М. Б. Альтмана происходит на длине 0,8 м).

Обработка результатов производилась следующим образом. В поперечном сечении спирального измерительного канала фиксировалось максимальное значение скорости $(v_{max})_н$ расплава и значение его температуры $T_н$ на носике потока. Затем было получено распределение скорости $(v_{max})_н$ (рисунок 6) и температуры $T_н$ (рисунок 7) по длине заливаемой пробы.

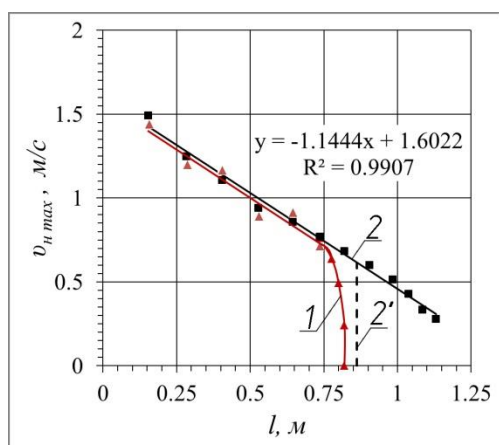


Рисунок 6 – Изменение скорости $(v_{\max})_n$ на носителе потока по мере заполнения пробы на жидкотекучесть: 1–по упруго-вязкопластической модели; 2– по модели с переменной вязкостью; 2' – остановка потока при 20% содержании твердой фазы; l – текущая длина заполненного канала

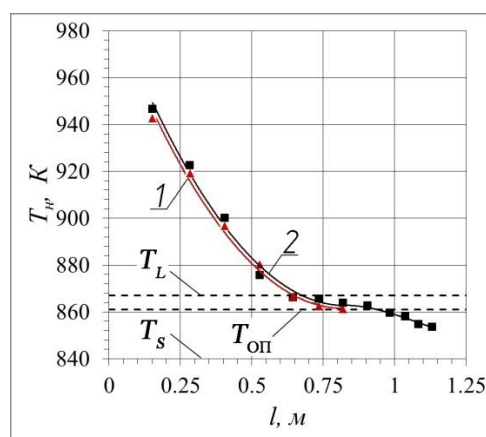


Рисунок 7 – Изменение температуры T_n на носителе потока при заполнения пробы на жидкотекучесть: 1–по упруго-вязкопластической модели; 2– по модели с переменной вязкостью

Как видно из рисунка 7, снятие перегрева расплава происходит на длине $\sim 0,640$ м. На длине $\sim 0,735$ м начинают проявляться пластические свойства расплава, что снижает скорость его продвижения по измерительному каналу спиральной пробы (рисунок 6, кривая 1). Методом подбора было установлено значение предела текучести τ_s при температуре $T_{оп}$ ($\tau_{соп}=200$ Па), при котором остановка потока происходила на длине $\sim 0,800$ м.

Численные эксперименты показали, что использование упруго-вязкопластической модели требует значительных вычислительных ресурсов. Продолжительность расчетов по сравнению с расчетами, выполненными с использованием модели с переменной, зависящей от текущей температуры расплава вязкостью, может увеличиться в ~ 3 раза. Для снижения требуемых ресурсов, влияние упруго-пластических характеристик расплава заменили, предусмотренной в программе FLOW 3D, принудительной остановкой потока при достижении на носителе потока 20% концентрации твердой фазы (рисунок 6, кривая 2' (пунктирная линия)).

В третьей главе показана возможность применения критерия K_{OF} при исследовании влияния технологических факторов на степень загрязненности отливки оксидными включениями. Разработаны дополнительные элементы литейной формы, способствующие уменьшению количества оксидных включений в теле отливки. Установлено значение толщины оксидной пленки, образующейся на свободной поверхности расплава при использовании верхних ЛС.

В качестве исследуемых технологических параметров были выбраны температура $T_{зал}$ заливки расплава и положение отливки в форме.

Для установления закономерности влияния температуры $T_{зал}$ заливки расплава на загрязненность отливки (на значение критерия K_{OF}) численные экспери-

менты проводили с использованием пробы М.В. Шарова и Н.М.Галдина (рисунок 2) и моделей расплава, учитывающих его различные характеристики. При этом в качестве исходного варианта ($T_{зал}=760^{\circ}\text{C}$) был выбран вариант расчета, выполненный при $Re=37540 > Re_{кр}$ (рисунок 3). Температура ликвидуса T_L сплава АК9 составляет 867 К. Численное моделирование производили изменяя температуру заливки $T_{зал}$ в диапазоне от 873К до 1050К, при этом учитывались реологические характеристики сплава, установленные во второй главе.

Как уже отмечалось, вязкость алюминиевых сплавов увеличивается с уменьшением температуры, а существенное изменение этой характеристики происходит перед началом кристаллизации и дальнейшем снижении температуры расплава. Известно и подтверждено в работе, что при этом уменьшается вероятность его струйного течения и растекания в формообразующей полости литейной формы.

Результат обработки экспериментов в программе Excel представлен на рисунке 8.

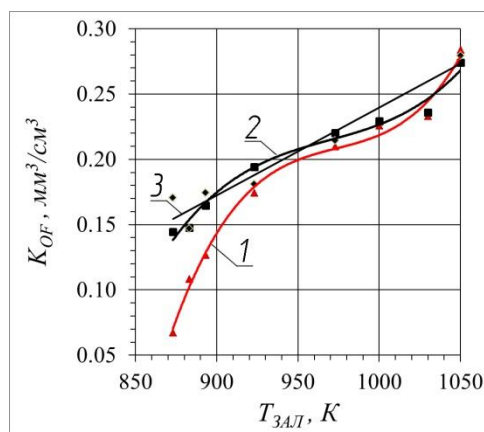


Рисунок 8 – Зависимость степени загрязненности материала отливки (K_{OF}) от температуры $T_{зал}$ заливки расплава: 1–по упруго-вязкопластической модели (критерий Пирсона $R^2=0,99$); 2– по модели с переменной, зависящей от текущей температуры вязкостью $\eta=f(T)$ ($R^2=0,98$); 3 –по модели с постоянной вязкостью $\eta=const$ ($R^2=0,94$)

Результаты, полученные по упруго- вязкопластической модели, в большей степени соответствуют физическим представлениям о поведении расплава в форме при температуре ниже температуры T_L ликвидуса. С изменением температуры $T_{зал}$ заливки от 873К до 973К количество оксидных включений в отливке увеличивается, что связано с уменьшением вязкости расплава. Дальнейшее увеличение температуры приводит к увеличению содержания включений, что вызвано более интенсивным протеканием окислительных процессов:

$$K_{OF} = 1,43 \cdot 10^{-7} \cdot T_{зал}^3 - 30467,0739 \cdot 10^{-8} \cdot T_{зал}^2 + 2969,7302 \cdot 10^{-4} \cdot T_{зал} - 96,384$$

Установленная связь является статистически значимой, так как значение коэффициента корреляции Пирсона $R^2= 0,99$.

Заметим, что эти результаты согласуются с практическими данными по изменению механических свойств кокильных отливок из сплава АК7ч. Семенченко А.И. отмечает рост предела прочности на $\sim 25\%$, а пластичности образцов для механических испытаний на разрыв, полученных литьем в кокиль, более чем в 3 ра-

за, при снижении температуры заливки расплава с 950 до 900К. Также им обращается внимание на то, что существуют условия, при которых будет происходить «...непрерывное повышение уровня механических свойств литого металла по мере снижения температуры заливки расплава...». К таким условиям они относят приложение внешнего давления.

Использование других моделей (рисунок 8, кривые 2, 3) при температуре заливки расплава ниже ~950К дает результаты, существенно отличающиеся от предыдущих и имеющих меньшую достоверность при их оценке с помощью коэффициента корреляции Пирсона. Наиболее близкие результаты получены с использованием модели расплава с переменной, зависящей от температуры вязкостью (рисунок 8, кривая 2).

Влияние положения отливки в форме на ее загрязненность оксидами изучали, изменяя значения угла $\alpha = \text{var}$ (рисунок 2) наклона контрольного участка пробы М.В. Шарова и Н.М.Галдина.

Несмотря на простую геометрию данной пробы, положение формообразующей полости во время заполнения может оказывать существенное влияние на количество образующихся оксидных включений и соответственно на качество готового изделия. Это обусловлено особенностями поведения потока расплава в формообразующей полости при разных углах наклона α . При его изменении также меняются значения минимально возможной площади свободной поверхности, которую можно определить из горизонтального сечения отливки. Так, если при угле $\alpha = 0^\circ$ значение этого параметра составляет $(F_{SR})_{\min} = 573 \text{ см}^2$, то при 90° $(F_{SR})_{\min} = 18 \text{ см}^2$.

При проведении численного моделирования скоростной режим заполнения формы соответствовал $Re = 37540 > Re_{KP}$, а температура заливки расплава 1030К (рисунок 3), угол наклона отливки α варьировали от 0° до 90° .

Результат обработки экспериментов в программе Excel представлен на рисунке 9.

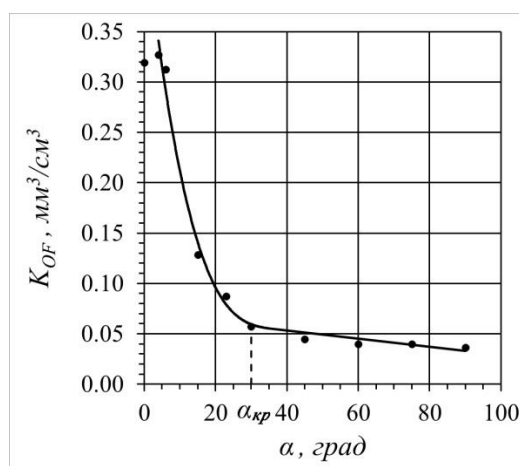


Рисунок 9 –Зависимость степени загрязненности расплава от угла наклона α отливки в форме

Из рисунка 9 видно, что с уменьшением угла наклона количество оксидных включений в форме, оцененное посредством критерия K_{OF} , растёт и резко увеличивается при уменьшении величины угла ниже критического значения ($\alpha_{кр} = 30^\circ$).

Для сравнительного анализа влияния положения отливки в форме на вероятность ее загрязнения оксидами было установлено влияние скоростного режима заполнения формы на степень загрязненности (K_{OF}) при разных значениях угла наклона α контрольного участка пробы М.В. Шарова и Н.М.Галдина.

При $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ характер заполнения формы и значение коэффициента K_{OF} от скоростного режима заполнения формы меняется незначительно и во всех случаях количество оксидных включений не превышает критического значения для данной отливки определенного в главе 2 ($K_{OF}=0,135$).

Была показана возможность управления скоростным режимом заполнения формообразующей полости кокиля на начальном, наиболее опасном с точки зрения образования оксидных включений этапе, путем применения специального дополнительного элемента ЛС (рисунок 10).

Эффективность такого способа управления устанавливалась путем изучения процесса заполнения отливки «Пластина» с размерами 230x100x10мм при использовании нижней сифонной ЛС.

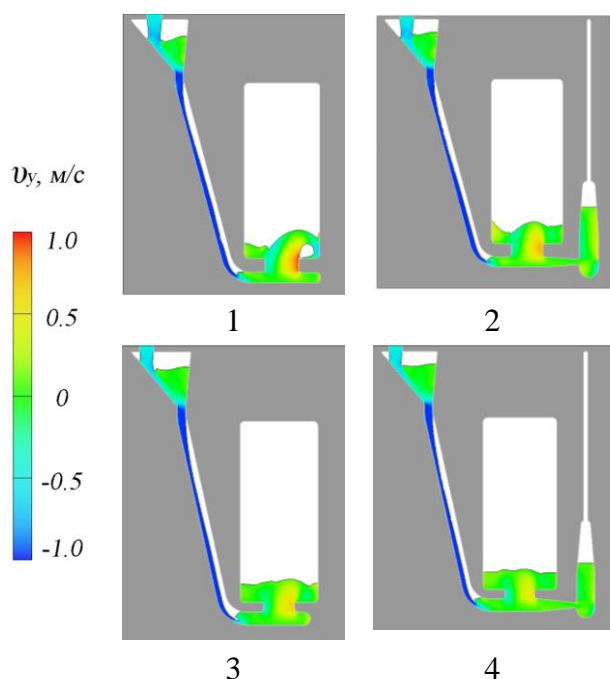


Рисунок 10 – Результаты моделирования начального этапа заполнения формы с нижней ЛС:

1– традиционная ЛС ($F_{ст}:F_{к}:F_{пит}=1:1.25:2.5$); 2–система с «промывником» (1:1.25:2.5); 3— традиционная ЛС (1:2:3); 4—система с «промывником» (1:2:3)

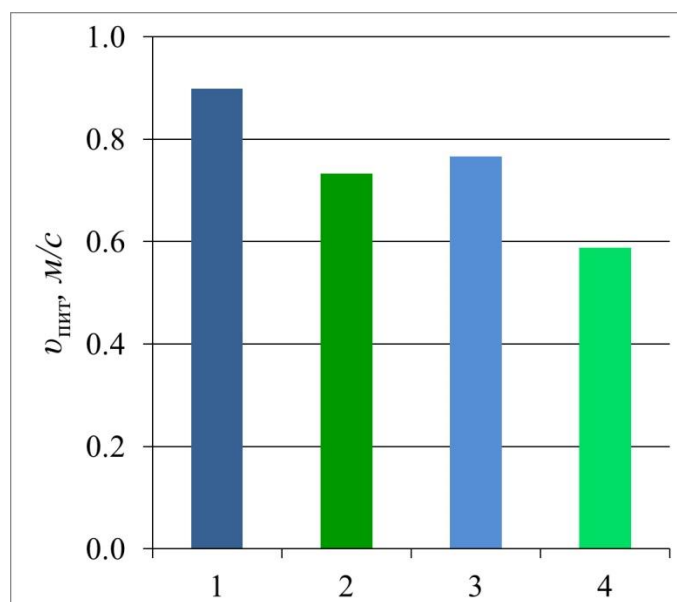


Рисунок 11 – Влияние конструкции нижней ЛС на значение максимальной скорости $v_{пит}$ в питателе:

Как видно (рисунок 11), без применения промывника и соотношении размеров каналов ЛС $F_{ст}:F_{к}:F_{пит}=1:1.25:2.5$, максимальное значение скорости v_y в питателе в момент начала заполнения формообразующей полости превышает 0,8 м/с (по данным Дж. Рунёро при достижении скорости в нижнем вертикальном питателе $\sim 0,75$ м/с возможно фонтанирование расплава). Применение дополнительного элемента ЛС позволяет снизить этот показатель более чем на 17% (рисунок 11,

вариант 2) и тем самым уменьшить вероятность возникновения явления фонтанирования.

Изменение соотношения размеров каналов до рекомендуемых $F_{ст}:F_{к}:F_{пит}=1:2:3$ снизило значение скорости до $v_{у\ max}\approx 0,8$ м/с (рисунок 11, вариант 3), что сохраняет вероятность фонтанирования. Применение «промывника» снизило эту скорость на $\sim 25\%$ (рисунок 11, вариант 4) и тем самым существенно снизило вероятность фонтанирования расплава на начальном этапе заполнения формообразующей полости.

Вместе с тем, «промывник» обеспечивает не только снижение скорости v_y в питателе, но и задерживает первые наиболее загрязненные порции расплава, поступающего в формообразующую полость из чаши и подводных каналов ЛС при ее традиционной схеме. При этом критерий K_{OF} снизился со значения 0,23 до 0,16 мм³/см³.

Также было выполнено исследование возможности снижения загрязненности отливок оксидами при верхнем подводе расплава в формообразующую полость путем установки «промывников». Использование таких элементов, соединенных с формообразующей полостью может способствовать сосредоточению в них оксидов в виде плен и их фрагментов, интенсивно образующихся на начальном этапе заливки формы.

В разработанном во второй главе критерии K_{OF} оценки загрязненности металла оксидными включениями учитывается средняя толщина h_p образующихся оксидов. Очевидно, что эта толщина существенно зависит от длительности контакта свободной поверхности расплава с атмосферой формы. При нижнем подводе расплава чаще всего реализуются условия для плавного подъема его уровня в форме без существенного возмущения свободной поверхности и, следовательно, ее обновления. В.В. Чистяков показал, что при таком заполнении формы средняя толщина образующейся оксидной пленки может достигать 5 мкм. Это значение было использовано нами в предыдущих исследованиях, выполненных с применением нижнего подвода расплава к формообразующей полости.

При использовании верхних ЛС, свободная поверхность расплава постоянно обновляется, образующиеся оксидные пленки разрушаются и замешиваются в поток, в связи с чем, их толщина может существенно отличаться от толщин при более спокойном заполнении формы.

Для уточнения наиболее вероятной средней толщины оксидных плен, образующихся при применении верхних ЛС, воспользовались результатами исследований Федуловой Ю.С. о влиянии силы N удара струи расплава на загрязненность отливки.

Эксперименты проводили при низких значениях силы ($0,025 < N < 0,25H$), т.к. именно в этом диапазоне загрязненность отливки в большей степени объясняется поражённостью оксидными включениями.

В результате численных экспериментов было уточнено критическое значение силы удара струи $N_{кр}=0,142H$, а также установлена соответствующая этой силе среднеинтегральная площадь свободной поверхности $F_{Sri}=29,71$ см².

Приняв допущение, что при критической силе удара весь кислород в форме вступил во взаимодействие с расплавом, толщину оксидной пленки определили из выражения:

$$h_p = \frac{V_{SRmax}}{F_{SRi}},$$

где V_{SRmax} – максимальный объем оксидов, образующихся в форме.

Для рассмотренных условий заливки формы (объемом $79,95\text{см}^3$) этот объем оксидов равен

$$V_{SRmax} = 8,3 \cdot 10^{-5} \cdot 79,95 = 6,636 \cdot 10^{-3} \text{см}^3, \text{ а средняя толщина оксидных плен}$$

$$h_p = \frac{6,636 \cdot 10^{-3}}{29,71} = 0,000223 \text{ см}$$

Округляя полученное значение, для последующих расчетов приняли $h_p = 0,002 \text{ мм}$

Четвертая глава посвящена апробации результатов диссертационной работы и внедрению их в производство. Показаны примеры использования разработанной методики сравнительной оценки технологических решений, полученных с использованием программ (FLOW-3D, ProCAST) для моделирования литейных процессов на ЭВМ, а также других результатов работы при проектировании технологии и оснастки для производства отливок электротехнического назначения с высокими требованиями по прочности и пластичности. Результаты, полученные с использованием этого сравнительного анализа, обеспечили не только необходимые механические свойства отливок, но и значительное сокращение объема финишных операций и увеличение $K_{им}$. При этом для реализации новых вариантов процессов использовались не только нижние и боковые, но и верхние системы подвода расплава.

Проверка адекватности разработанной методики проводилась путем оценки технологических параметров отлаженного и хорошо себя зарекомендовавшего процесса получения отливки «Поршень», конструкция ЛС которой (рисунок 12) воспроизведена по фотографии.

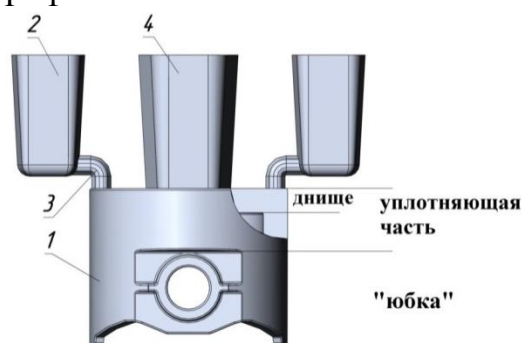


Рисунок 12 – Поршень двигателя легкового автомобиля с элементами литейной формы: 1 – отливка «Поршень»; 2 – литниковая чаша; 3 – стояк; 4 – прибыль

Была установлена зависимость загрязненности отливки «Поршень» от силы удара струи расплава по зеркалу металла в форме.

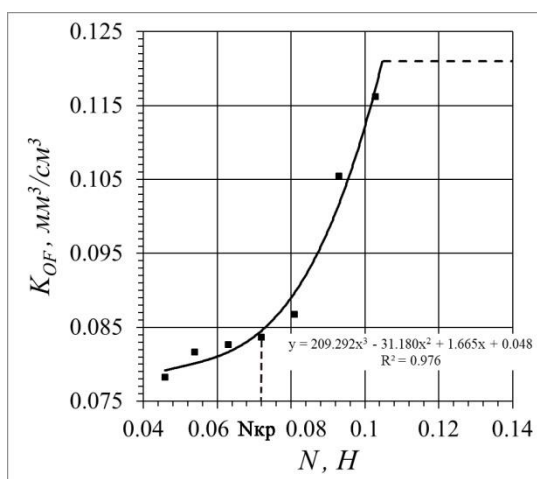


Рисунок 13 – Зависимость степени загрязненности материала отливки «Поршень» от силы N удара струи

Путем изменения размеров подводящего канала (стояка) выявлено критическое значение этой силы, приводящее к резкому повышению загрязненности отливки (из рисунка 13 видно, что для данной технологии критическое значение силы $N=0,072 Н$, которое достигается при диаметре стояка 7,5 мм). Более жесткое пороговое значение, по сравнению с данными полученными Ю.С. Федуловой ($N_{кр}=0,2 Н$) можно объяснить сложностью геометрии формы и встречным течением расплава, поступающего через два стояка.

Проиллюстрировано влияние силы удара струи и температуры заливки расплава на скорость восходящих потоков влияющих на перераспределение оксидов по объему отливки.

В случае, когда требования к литой детали не допускают присутствия в ней оксидных включений, были предложены дополнительные элементы ЛС (промывники), располагаемые на нижнем уровне формообразующей полости кокиля и соединенные с последней. Эффективность их использования была оценена посредством критерия K_{OF} . (рисунок 14).

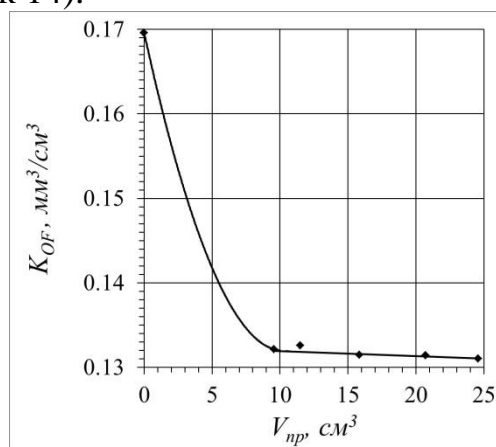


Рисунок 14 – Кинетика изменения K_{OF} от объема промывника $V_{пр}$

Промывники как малого ($V_{np}=9,55 \text{ см}^3$), так и большого объема ($V_{np}=24,6 \text{ см}^3$) в равной степени способствуют существенной стабилизации заполнения формообразующей полости и уменьшению критерия K_{OF} по сравнению с заливкой кокиля без их применения (рисунок 14).

Объем дополнительных элементов, обеспечивающих наибольший положительный эффект был установлен с учётом объема расплава, поступившего в чашу и формообразующую полость за время первого неустановившегося этапа заполнения, характеризующегося максимальным значением площади свободной поверхности расплава. Суммарный объем промывников должен составлять $V_{np}=15...20 \text{ см}^3$. Использование промывников больших размеров приведет в основном к снижению $K_{ИМ}$. Так, если промывники не используются, $K_{ИМ}=54\%$, при $V_{np}=9,55 \text{ см}^3$ его значение составляет 53%, при $V_{np}=24,6 \text{ см}^3$ не превышает 50%. Некоторое положительное влияние увеличения объема промывников может быть ожидаемо в связи с уменьшением концентрации O_2 в объеме формообразующей полости при более продолжительном заполнении промывников, а также стабилизацией загрязненности расплава в чаше.

Пример практического использования результатов исследований показан на отливках электротехнического назначения «Корпус» (рисунок 15) и «Луч» (рисунок 16).



Рисунок 15 –Фотография отливки «Корпус 3»



Рисунок 16 –Фотография отливки «Луч»

Было выполнено сравнение заводских технологий изготовления данных литых деталей со вновь разработанными.

Анализ влияния массового расхода на загрязненность расплава оксидными включениями показал, что использованная для получения отливки «Корпус» в заводской технологии нижняя ЛС обеспечивает более низкие значения критерия K_{OF} (Рисунок 17) по сравнению с верхним подводом, осуществленным по новой технологии (Рисунок 18).

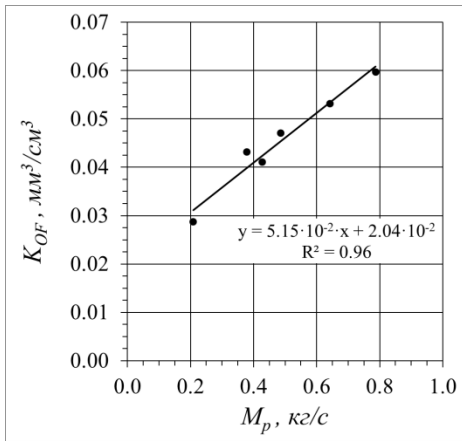


Рисунок 17 – Зависимость степени загрязненности (K_{OF}) материала отливки «Корпус 3» от массового расхода M_p при использовании заводской технологии

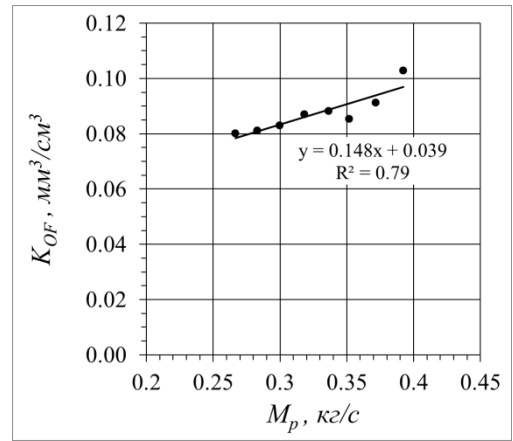


Рисунок 18 — Зависимость степени загрязненности (K_{OF}) материала отливки «Корпус 3» от массового расхода M_p при использовании новой технологии

Однако конструкция заводской ЛС не оснащена никакими средствами предотвращения попадания разрушенных оксидных плен в формообразующую полость. При этом высокие значения скорости восходящих потоков при применении нижнего подвода расплава приводят к перераспределению включений по его объему (рисунок 19). В тоже время, несмотря на то, что верхняя ЛС способствует заполнению формы при большей площади поверхности расплава, подвергаемой окислению, образующиеся включения, при организуемом месте подвода, сосредотачиваются в малонагруженных частях отливки и не будут сказываться на ее эксплуатационных характеристиках. Невысокая вероятность перераспределения оксидов при таком подводе также подтверждается анализом скоростей восходящих потоков (рисунок 20).

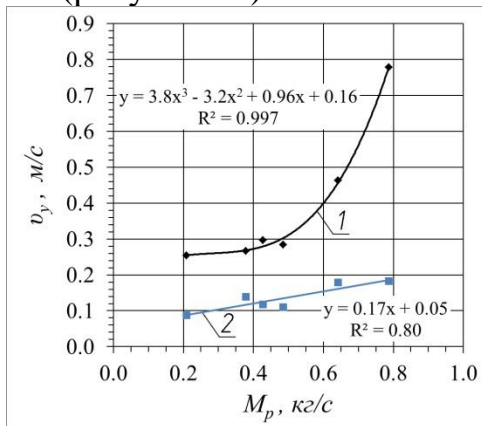


Рисунок 19 – Зависимость максимальной скорости v_y в восходящих потоках в нижних сечениях отливки от расхода M_p : 1 – при 50 % заполнении формообразующей полости; 2 – при 100% заполнении формообразующей полости

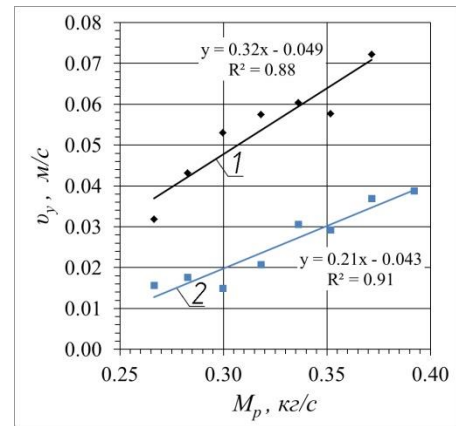
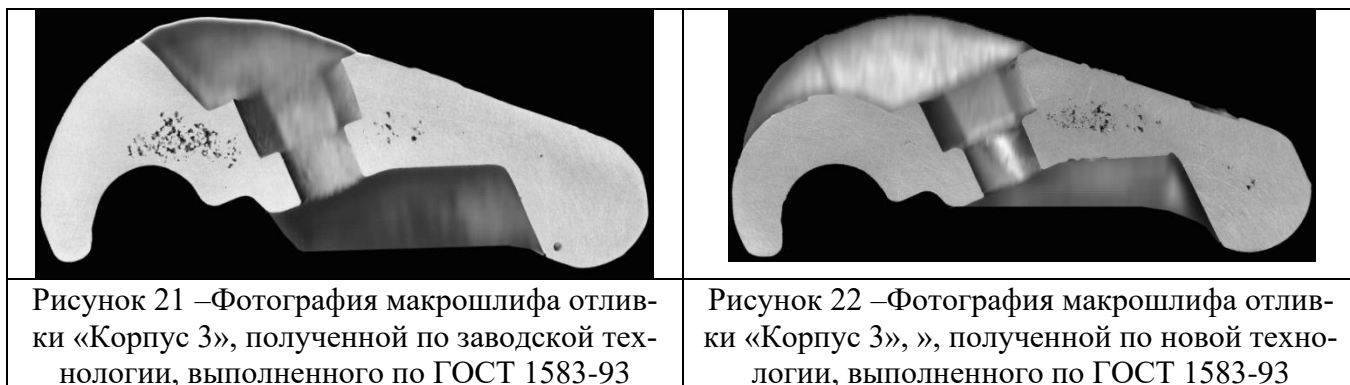


Рисунок 20 – Зависимость максимальной скорости v_y в восходящих потоках в нижних сечениях отливки от расхода M_p : 1 – при 50 % заполнении формообразующей полости; 2 – при 100% заполнении формообразующей полости

Кроме того были выполнены макрошлифы отливок, показавшие области сосредоточения макропористости, на появление которых также оказывают влияние фрагменты оксидных плен присутствующие в расплаве (рисунок 21, 22).



Таким образом, было установлено, что в случае применения заводской технологии велика вероятность образования дефектов в ответственных местах отливки, к которым предъявляются повышенные требования по прочности и пластичности.

При анализе заводской и новой технологии изготовления отливки «Луч» также использовалась описанная выше методика сравнения.

Использование результатов диссертационной работы при разработке новых технологий изготовления обеих отливок позволило сократить сроки доводки технологических процессов и обеспечить служебные свойства отливок при повышении коэффициента использования металла $K_{ИМ}$ (~в 2 раза).

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Критерий K_{OF} загрязненности отливки оксидами обеспечивает прогнозирование возможного содержания в отливке таких включений по результатам численного моделирования процесса заливки кокилей в программах FLOW 3D или ProCAST. Достоверность этого прогнозирования подтверждена сравнительным анализом результатов численного моделирования с экспериментальными данными натуральных экспериментов, выполненных М.В. Шаровым и Н.М. Галдиным, а так же результатами его использования для решения практических задач.
2. Разработана методика определения реологических свойств расплава путем моделирования заливки стандартной спиральной пробы на жидкотекучесть (ГОСТ 16438-70) в программе FLOW 3D, сопоставлением результатов численного и натурального экспериментов и подбором требуемых реологических характеристик модели расплава.
3. Определены параметры реологической модели расплава (сплава АК9), позволяющие осуществлять моделирование процесса гравитационной заливки форм этим и подобными сплавами, в том числе, и при условии снятия перегрева до завершения заполнения формообразующей полости литейной формы.
4. При выборе положения отливки в форме, заливаемой с использованием нижних литниковых систем, необходимо стремиться к обеспечению минимально-

го среднеинтегрального значения площади горизонтального поперечного сечения формообразующей полости.

5. Численными экспериментами и практическим использованием их результатов подтверждено, что при использовании верхних литниковых систем существуют скоростные ограничения заполнения формообразующей полости. Эти ограничения обусловлены степенью воздействия струи расплава на донную часть формы и зеркало расплава в ней. Это воздействие может быть оценено по силе N удара струи и не должно превышать ее критического значения $0,072 < N_{кр} < 0,2Н$, зависящего от параметров литниковой системы и конфигурации отливки.
6. Обеспечение требуемых свойств отливок из алюминиевых сплавов, зависящих от степени загрязненности материала оксидными включениями, возможно путем сосредоточения продуктов окисления в промывниках или в тех частях отливки, которые не оказывают влияние на ее служебные свойства.
7. Численные эксперименты показали, что требуемое качество отливки «Поршень», получаемой путем использования верхней заливки кокиля, обеспечивается, в том числе и в результате сосредоточения оксидов в ненагруженных частях отливки. Для снижения вероятности выноса оксидов в уплотняющую часть «Поршня», повышения плотности, механических свойств, герметичности и стабильности характеристик отливки в целом, целесообразно использование промывников.
8. Практическим использованием результатов исследования подтверждена возможность использования предлагаемой методики расчета литниковых систем для кокильных фасонных отливок из алюминиевых сплавов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. **Зарубин А.М., Зарубина О.А.** Анализ работы литниковых воронок при литье в кокиль отливок из алюминиевых сплавов// Литейщик России. 2015. №10. С.44–46.
2. **Зарубин А.М., Зарубина О.А.** Исследование процесса течения расплава в стояках при литье в кокиль // Литейное производство. 2016. №11. С.25–28.
3. **Зарубин А.М., Зарубина О.А.** Управление скоростью течения расплава в форме при литье в кокиль алюминиевых сплавов// Литейное производство. 2017. №6. С.16–21.
4. **Зарубин А.М., Зарубина О.А.** Исследование работы вертикально-щелевой литниковой системы при литье в кокиль// Литейное производство. 2017. №10. С.27–30.
5. **Зарубина О.А., Зарубин А.М.** Управление содержанием и распределением оксидных включений в кокильных отливках из алюминиевых спла-

- вов//Заготовительные производства в машиностроении. 2019. Т. 18. № 1. С. 3–6.
6. **Зарубина О.А., Зарубин А.М., Коротченко А.Ю.** Оценка содержания оксидных включений в кокильных отливках из Al-сплавов на этапе разработки технологии// Литейное производство. 2019. №10. С. 26–29.
 7. **Зарубина О.А., Зарубин А.М.** Особенности изготовления кокильных отливок с использованием верхних литниковых систем // Литейное производство. 2019. №11. С. 24–28.
 8. **Зарубина О.А., Зарубин А.М.** Прогнозирование содержания оксидов и пористости в отливках из алюминиевых сплавов//Заготовительные производства в машиностроении. 2020. Т. 18. № 5. С. 195 – 198.
 9. **Зарубина О.А.** Оптимальное использование программы FLOW 3D для решения задач литейной технологии// Литейное производство. 2020. №11. С. 19–22.
 10. **Зарубина О.А., Зарубин А.М.** Критерий загрязненности силуминовых отливок оксидами при литье в кокиль // Заготовительные производства в машиностроении. 2021. Т. 19. № 3. С. 99 – 103.

Публикации в научных изданиях, индексируемых в международных системах цитирования Scopus:

11. **Zarubina O.A., Korotchenko A.Y., Zarubin A. M.** Assessment of Mold Filling Rate Influence on Amount of Oxide Films in Castings by Numerical Simulation *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 989. P 595-599.

Материалы конференций:

1. **Зарубина О.А.** Анализ работы массивных стояков при литье в кокиль отливок из алюминиевых сплавов// Сборник трудов Всерос. конф. молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроение России». Москва. 2016. С. 133–137.
2. **Зарубина О.А., Коротченко А.Ю.** Анализ работы вертикально-щелевой литниковой системы при литье в кокиль отливок из алюминиевых сплавов//Сборник трудов Всерос. конф. молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроение России». Москва. 2017. С. 77–80.
3. **Зарубина О.А.** Влияние места подвода расплава на температурное поле в рабочей полости кокиля при изготовлении отливок из алюминиевых сплавов//Сборник трудов Всерос. конф. молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроение России». 2019. С. 168–171.