

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»



Целовальник Юрий Всеволодович

Изучение температурной зависимости коэффициента теплопередачи между
металлом и литейной формой для повышения адекватности компьютерного
моделирования литейных процессов

2.6.3 – «Литейное производство»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
Кандидат технических наук
Баженов Вячеслав Евгеньевич

Москва – 2023

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие компьютерных технологий привело к применению математического моделирования в различных областях техники и технологии, в том числе и в литейном производстве. Широкое распространение систем компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП), значительно упростило процесс прогнозирования возможных областей образования литейных дефектов. Однако адекватность результатов компьютерного моделирования, полученных с использованием различных программных продуктов, результатам, получаемым при литье реальных отливок, не всегда одинакова. Это связано не только с адекватностью используемой математической модели, но и с используемыми при расчете теплофизическими свойствами материалов и граничными условиями. Для получения адекватных результатов математического моделирования, необходимо их обязательное сопоставление с экспериментом и последующее уточнение исходных данных, применяемых в компьютерной модели.

Одним из наиболее важных граничных условий является коэффициент теплопередачи между отливкой и формой. Величина коэффициента теплопередачи не постоянна в интервале температур при которых происходит литье, затвердевание и охлаждение отливки в форме и зависит от множества факторов. По этой причине её обычно определяют экспериментально. В работе будет рассмотрено влияние состава сплава и материала формы на значение коэффициента теплопередачи между отливкой и формой.

Целью работы, является повышение адекватности моделирования путём нахождения коэффициентов теплопередачи для различных пар сплав-форма и поиск связи между значением коэффициента теплопередачи с параметрами кристаллизации сплава.

Для достижений поставленной цели решались следующие задачи:

1. С помощью заливки цилиндрических слитков из сплавов на основе алюминия, магния и меди получить температурные поля в формах и кривые охлаждения в слитках, залитых в формы из ХТС, стали и графита.

2. Путем сопоставления смоделированных и экспериментальных температурных полей в слитках и формах, с использованием метода минимизации функции ошибок, получить зависимости коэффициента теплопередачи от температуры.

3. На основе результатов анализа литературных источников провести сравнение расчётных теплофизических свойства сплавов, которые необходимо получить с помощью термодинамической базы программы ProCast. Уточнить теплофизические свойства литейных форм, используемых при компьютерном моделировании на основании анализа литературных источников.

4. На основе анализа температурных зависимостей коэффициентов теплопередачи между алюминиевыми сплавами Al-3Si, Al-7Si Al-12Si и формами из стали и графита, установить влияние интервала кристаллизации сплава на вид температурной зависимости коэффициента теплопередачи.

5. Сопоставить значения коэффициента теплопередачи при заливке сплавов на основе алюминия и магния в формы из холоднотвердеющей смеси, стали и графита, обеспечивающие различные скорости охлаждения.

Научная новизна:

1. Разработана методика определения значения коэффициента теплопередачи между сплавом и литейной формой путем сопоставления экспериментально полученных и рассчитанных с использованием программ компьютерного моделирования литейных процессов температурных полей с последующей минимизацией функции ошибки.

2. На примере сплавов Al-3Si, Al-7Si Al-12Si при литье в стальную и графитовую форму, показано влияние интервала кристаллизации сплава на вид температурной зависимости коэффициента теплопередачи.

3. Установлено, что при литье алюминиевых и магниевых сплавов в формы из графита, стали и холоднотвердеющей смеси максимальная величина коэффициента теплопередачи составляет 900-1200, 2000-2500 и 4500-4700 Вт/м²К, соответственно. То есть коэффициенты теплопередачи соотносятся как 1:2:4.

Практическая значимость:

1. Были найдены температурные зависимости коэффициентов теплопередачи на границе слиток/форма при заливке сплавов Al-3Si, Al-7Si, Al-12Si, МЛ5, БрО8Ц4 и чистого алюминия А99 в формы из холоднотвердеющей смеси, стали и графита, в широком диапазоне от температуры заливки до извлечения отливки из формы.

2. Найденные в работе значения коэффициента теплопередачи могут быть использованы при моделировании процессов заполнения и затвердевания отливок из алюминиевых сплавов (Al-3Si, Al-7Si, Al-12Si), магниевого сплава МЛ5, бронзы БрО8Ц4 и чистого алюминия А99 в формы из ХТС, стали и графита и повысят адекватность моделирования распределения температур в отливке и форме, что в свою очередь позволит достоверно прогнозировать образование недоливов, усадочных дефектов и термических напряжений.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

1. 2015 г. Труды 8-ой международной научно-практической конференции «Прогрессивные Литейные технологии». Тема доклада: «Экспериментальное определение коэффициента теплопередачи между сплавом АК7ч и формой из ХТС».

2. 2016 г. Труды 11-й международной научно-практической конференции, посвященной 120-летию со дня рождения профессора Наума Григорьевича Гиршовича. Тема доклада: «Определение граничных условий для моделирования процесса литья алюминия в форму из графита».

3. 2019 г. Одиннадцатый международный конгресс «Цветные металлы и минералы». Тема доклада: «Определение коэффициента теплопередачи на границе метал-форма при литье алюминиевого сплава АК7ч в формы из стали и графита».

4. 2020 г. XII Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике «Современные аспекты в области исследований структурно-фазовых превращений при

создании материалов нового поколения». Тема доклада: «Моделирование жидкотекучести при литье сплавов АК7 и МЛ5 в форму из графита».

5. 2020 г. Труды X международной научно-практической конференции «Прогрессивные Литейные технологии». Тема доклада: «Определение коэффициента теплопередачи между слитком из бронзы БрО8Ц4 и формой из ХТС»

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 5 статей, отражающих основные положения исследования в журналах, индексируемых WoS и Scopus.

Достоверность научных результатов. О надежности результатов свидетельствует повторяемость результатов, высокая оценка представленных данных на многочисленных профильных конференциях, а также публикации в рецензируемых журналах, входящих в первый и второй квартиль Web of Science (Core Collection)/Scopus. Все испытания были проведены в соответствии с рекомендациями действующих ГОСТов. Текст диссертации и автореферата были проверены на предмет плагиата с помощью программы "Антиплагиат" (<http://antiplagiat.ru>).

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературных источников из 92 наименований. Общий объём работы составляет 125 страниц машинописного текста, включая 49 рисунков, 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика работы обоснована актуальность темы диссертации. Изложены цель и задачи диссертационного исследования.

Первая глава включает в себя обзор литературы по тематике исследования. Приводятся общие теоретические сведения о коэффициенте теплопередачи, его физическом смысле, его роли в литейном производстве, использовании в моделировании. Показано, что величина коэффициента теплопередачи непостоянна и может меняться в процессе затвердевания отливки и её дальнейшего охлаждения в широких пределах.

Рассмотрены основные методики определения коэффициента теплопередачи: метод хронометрирования, инверсионный метод, метод проб и ошибок. Проанализированы результаты определения коэффициента теплопередачи для различных пар металл/форма, полученные авторами указанными методами.

Проанализированы наиболее широко применяемые материалы для изготовления разовых и постоянных литейных форм на производстве, с обоснованием выбора материалов форм, используемых в диссертационном исследовании. Материалы формы выбирались способные обеспечить различные скорости охлаждения. В результате в качестве материалов для дальнейшего исследования были выбраны холодно твердеющая смесь, сталь и графит.

Приведено обоснование выбора сплавов для исследования. Так сплавы на основе системы Al-Si были выбраны для исследования из-за их широкого распространения и изученности, а также возможности вычисления их теплофизических свойств с использованием термодинамических баз данных. Кроме того, рассчитанные свойства могут быть верифицированы путем сравнения с существующими литературными данными.

Рассмотрены возможности наиболее известных современных систем компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП), и выбрана наиболее подходящая для задач исследования СКМ ЛП ProCast.

Вторая глава включает в себя описание материалов и методик исследования. Объектами исследования являлись алюминиевые сплавы системы Al-Si: Al-3Si, Al-7Si, Al-12Si (цифра указывает на содержание элемента в мас.%), алюминий, магниевый сплав МЛ5, и бронза БрО8Ц4. Формы изготавливали из ХТС на фурановой основе, стали Ст3 и графита марки ГМЗ (графит малозольный).

В формы устанавливали хромель-алюмелевые термопары на разных расстояниях от поверхности раздела металл-форма. Также чаще всего одна термопара устанавливалась в полость формы. Заливку сплавов производили в формы с одновременной записью температурных полей с помощью 12-канального термоизмерителя ВТМ-4208SD фирмы Lutron.

В форме из ХТС размещали 12 термопар на трех уровнях по высоте формы (рис. 1, а). Термопары находились в форме на расстоянии 2, 10, 20 и 30 мм от формообразующей поверхности. Расстояние между уровнями составляло 40 мм, а между термопарами одного уровня - 10 мм. В случае заливки сплавов МЛ5 и БрО8Ц4, термопару Т12 перемещали в полость формы для записи кривой охлаждения сплава. Термопары Т1, Т5 и Т9 были перенесены на небольшое расстояние (2 мм) от поверхности раздела металл-форма, чтобы избежать смачивания расплавом.

В стальной форме устанавливалось 4 термопары, которые располагались с четырех сторон на одном уровне (рис. 1,б). Хромель-алюмелевые термопары, располагались на расстояниях 2, 5, 10 и 15 мм от внутренней стенки изложницы.

Использовали два варианта графитовой формы. Схема расположения термопар для графитовой формы №1 показана на рисунке 1, (в). Термопары располагали на двух уровнях по высоте (рисунок 1, в). Расстояние между нижним и верхним уровнем по вертикали составляло 40 мм. Расстояние от рабочей поверхности формы до термопар Т1, Т6 - 2 мм; Т2, Т7 - 5 мм; Т3, Т8 - 10 мм; Т4, Т9 - 20 мм.

В графитовой форме №2 (рис.1, г), устанавливали 5 термопар, горячие спаи термопар располагались от границы раздела металл-форма на 2 и 5 мм в левой полуформе и на 5, 10 и 20 мм в правой полуформе. Спаи термопар Т2 и

T5 находились на одинаковом расстоянии от рабочей поверхности формы, но T2 была на боковой поверхности, а T5 снизу.

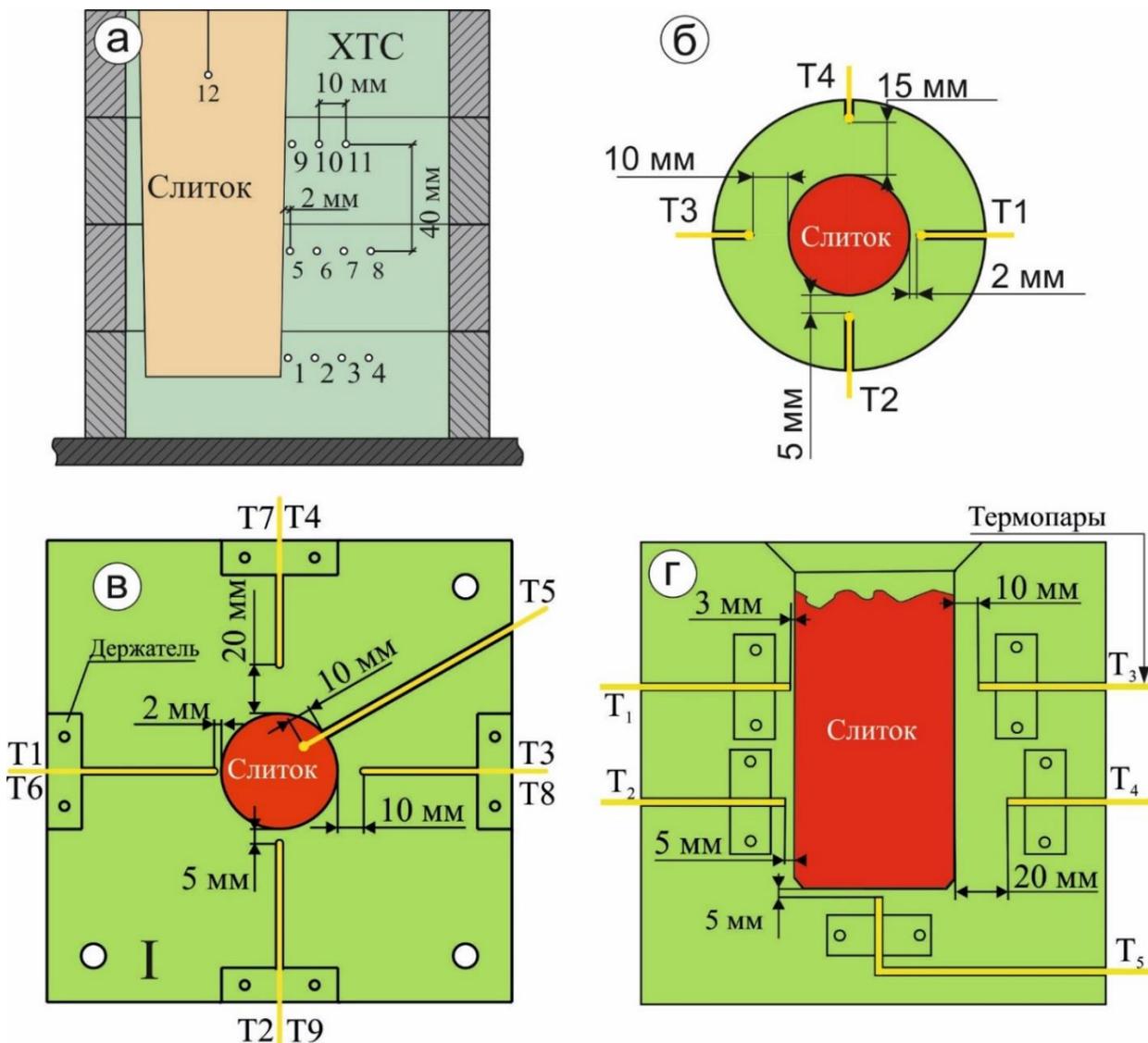


Рисунок 1 – Схема расположения термопар в формах из: а - ХТС, б – стали, в – графита №1, г – графита №2

Для определения коэффициента теплопередачи проводили моделирование процесса заливки сплавов в формы представленные на рисунке 2. в программе «ProCast» при различных значения коэффициента теплопередачи. Способ задания коэффициента теплопередачи будет рассмотрен ниже. Далее сравнивали температурные поля, записанные с помощью термопар и рассчитанные температурные поля путём вычисления функции ошибок. Чем ближе задаваемое значение коэффициента

теплопередачи в истинному, тем меньше будет разность между рассчитанными и экспериментальными температурными кривыми. Для моделирования в качестве начальных условий задавали температуры и время заливки, наблюдаемые для при экспериментальных заливках.

Коэффициент теплопередачи задавали в виде зависимости от температуры поверхности слитка. В случае поиска коэффициента теплопередачи между сплавами и формой из ХТС выше температуры ликвидуса задавали значение h_{liq} с шагом $100 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, а ниже температуры солидуса значение коэффициента h_{sol} . В интервале кристаллизации значение менялось от h_{liq} до h_{sol} по линейной зависимости, как показано на рисунке 2, а. Коэффициент теплопередачи между сплавами и формами из графита и стали подбирали более сложным способом, чем для формы из ХТС. Значения коэффициента теплопередачи определяли не только для температур поверхности отливки равных температурам ликвидуса и солидуса сплава, но и в дополнительных промежуточных точках (t_i) (рисунке 2, б).

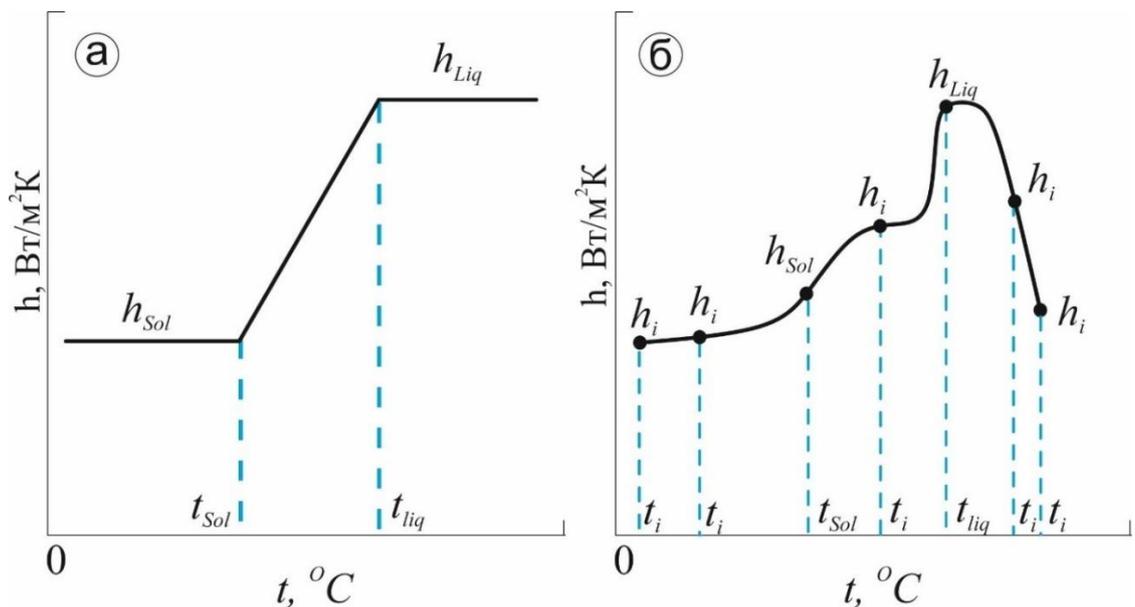


Рисунок 2 – Вид зависимости коэффициента теплопередачи от температуры поверхности отливки используемый для его определения при заливке сплавов в: а) формы из ХТС, б) формы из графита и стали.

В третьей главе приводятся результаты анализа теплофизических свойств материалов, используемых при моделировании для поиска

коэффициентов теплопередачи. С помощью термодинамической базы «CompuTherm», входящей в состав программы «ProCast» были рассчитаны теплофизические свойства сплавов: теплопроводность, теплоёмкость, плотность. На рисунке 3 в качестве примера представлены теплофизические свойства сплава Al-7Si. Можно видеть, что теплофизические свойства, рассчитанные с помощью термодинамической базы достаточно близки к свойствам из литературы. Аналогичные результаты были получены и для остальных сплавов (в том числе и материала формы СтЗ). Таким образом, свойства, полученные в программе «ProCast», могут быть использованы для определения коэффициента теплопередачи.

Теплофизические свойства материалов формы - ХТС и графита, имеющиеся в БД «ProCast» были сравнены с литературными источниками. Оказалось, что они не в полной мере коррелируют с литературными данными, особенно для графита. В связи с этим при расчетах использовались теплофизические свойства ХТС и графита, взятые из литературных источников.

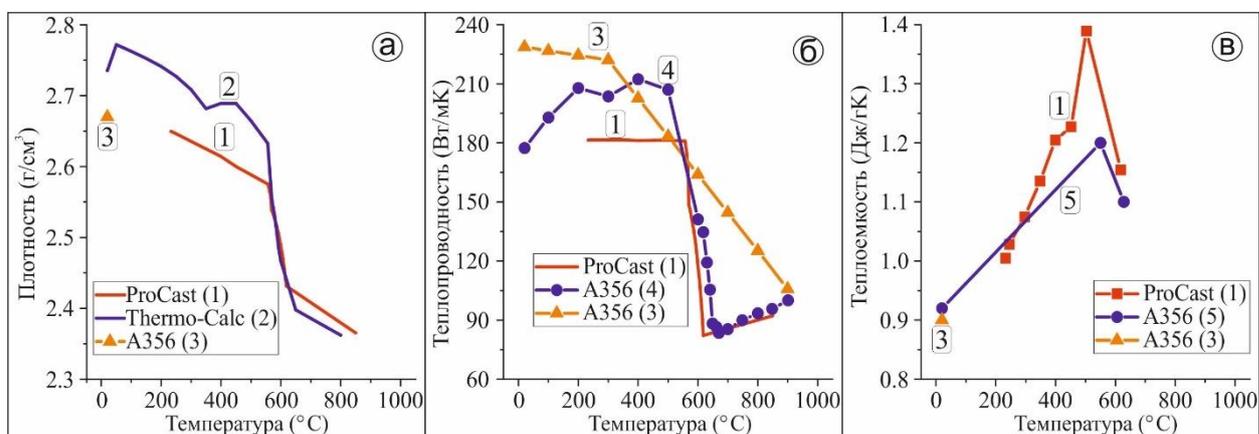


Рисунок 3 - Теплофизические свойства сплава Al-7Si рассчитанные в ProCast и Thermo-Calc, а также свойства аналогов из литературы: а) плотность; б) теплопроводность; в) теплоемкость в зависимости от температуры: 1 – ProCast; 2- TermoCalc; 3 – 5 – Свойства сплава A356 из литературных источников.

В четвертой главе приводятся результаты определения коэффициента теплопередачи между слитками из сплавов системы Al-Si, сплавом МЛ5,

бронзой БрО8Ц4 и формами из ХТС, стали и графита. Значения коэффициента теплопередачи получали виде графиков зависимости от температуры поверхности слитка.

На рисунке 4 показаны графики зависимости коэффициента теплопередачи от температуры поверхности слитка при заливке сплавов Al-7Si, МЛ15 и БрО8Ц4 в форму из ХТС. Значение коэффициента теплопередачи для сплавов Al-7Si и МЛ15 выше температуры ликвидуса достаточно близко и составляет 900 и 1100 Вт/(м²·К) соответственно (рис.4). При затвердевании значение коэффициента теплопередачи снижается до 600 Вт/(м²·К) для обоих сплавов.

Для сплава БрО8Ц4 (рис.4) был найден коэффициент теплопередачи при большем количестве температурных точек. Можно видеть, что значения коэффициента теплопередачи при $T_L = 995$ °С составляет 300 Вт/(м²·К), а при температуре $T_s = 673$ °С значение коэффициента теплопередачи составляет 20 Вт/(м²·К). То есть значения коэффициента теплопередачи несколько ниже, что не означает менее интенсивной передачи тепла, а связано с большей разностью температур между сплавом и формой при заливке бронзы.

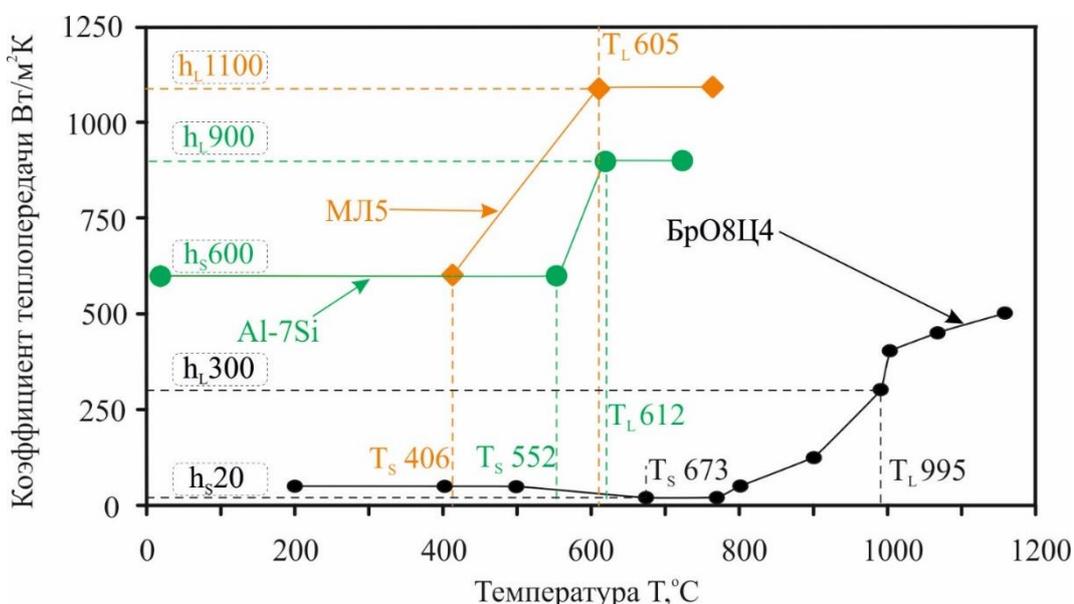


Рисунок 4 - Зависимость коэффициента теплопередачи от температуры поверхности слитка для сплава Al-7Si, сплава МЛ15, сплава БрО8Ц4 при литье в форму из ХТС

Для каждой пары металл-форма были построены графики показывающие смоделированные и экспериментальные температурные поля в форме и слитке. Такой график, полученный для случая заливки сплава Al-7Si в форму из стали, представлен на рисунке 5. На рисунке представлены расчетные значения температуры, когда использовались найденные в работе значения коэффициента теплопередачи (рис. 6,б), расчетные значения полученные с постоянным коэффициентом теплопередачи $500 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ и экспериментальные значения температуры. Как видно из графиков, температурные поля для расчетных и экспериментальных значений хорошо согласуются для большинства термопар, если расчёты произведены с использованием найденной в работе температурной зависимости коэффициента теплопередачи. Максимальное расхождение достигается для термопары Т4 и составляет не более 25°C . Однако расхождения между экспериментальными и расчетными значениями температур, полученными с постоянным коэффициентом теплопередачи гораздо больше и достигают 135°C . Использование постоянного значения коэффициента теплопередачи не позволяет получить достоверное распределение температуры в форме и слитке при моделировании. Особенно велики расхождения для кривой охлаждения, записанной при затвердевании слитка. Для других пар металл-форма были получены близкие результаты. Во всех случаях применение в моделировании найденной зависимости коэффициента теплопередачи от температуры позволяло получить минимальное отклонение расчётных температурных полей от экспериментальных. При этом использование постоянного значения коэффициента теплопередачи не позволяет получить адекватного эксперименту распределения температур.

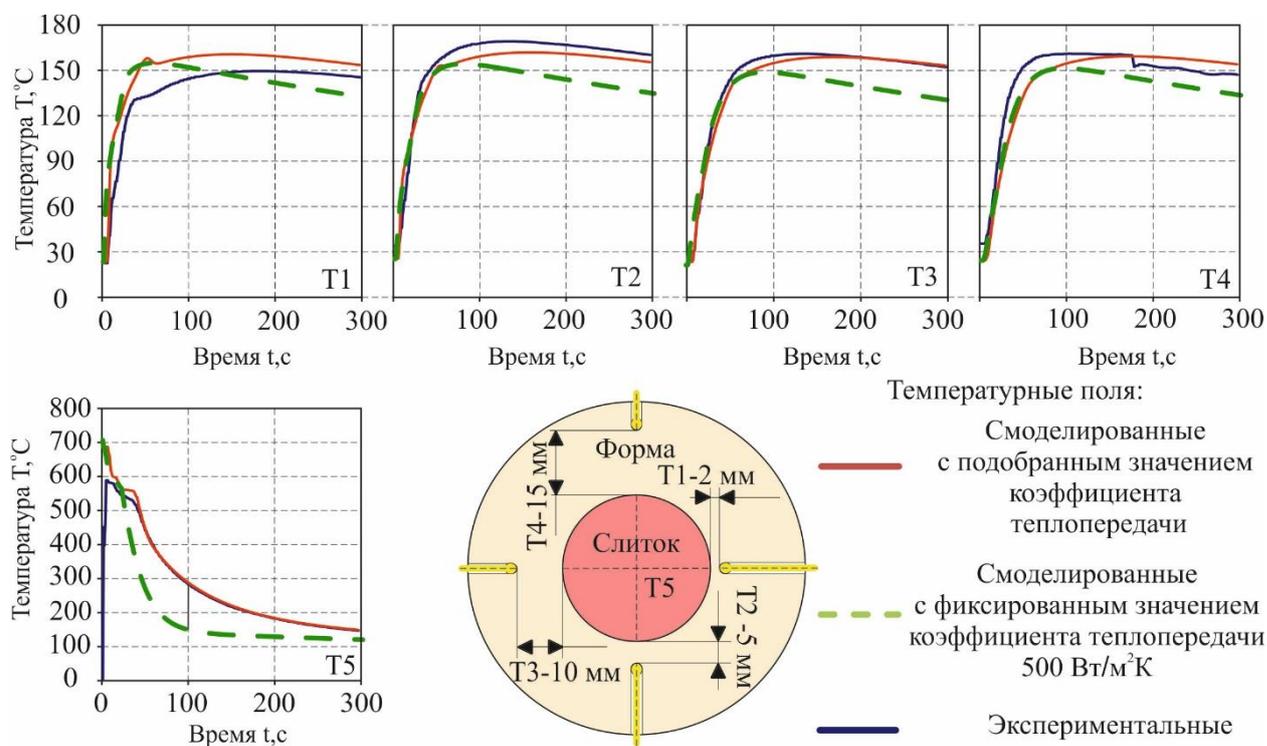


Рисунок 5 – Экспериментальные (сплошные синие T1-T5), полученные в процессе моделирования с найденным значением коэффициента теплопередачи (сплошные красные T1-T5), полученные в процессе моделирования с постоянным значением коэффициента теплопередачи 500 Вт/м²·К (штриховые зеленые T1-T5) температурные кривые для случая заливки сплава Al-7Si в форму из стали Ст3

В пятой главе приводятся результаты сопоставления зависимостей коэффициента теплопередачи от температуры поверхности слитка для сплавов, залитых в формы, обеспечивающие различные скорости охлаждения.

На рисунке 6,(а) представлены графики зависимости коэффициента теплопередачи от температуры поверхности слитка, между отливкой из сплава Al-3Si и формами из графита и стали Ст3. Максимальное значение достигается для стальной и графитовой форм при различных температурах, для стальной формы максимальное значение коэффициента теплопередачи составляет 2530 Вт/м²К при температуре поверхности слитка 664 °С, то есть чуть выше температуры ликвидуса сплава. Для графитовой формы максимальное значение коэффициента теплопередачи составляет 4500 Вт/м²К и достигается при температуре поверхности отливки 540 °С, чуть ниже температуры солидуса сплава. Скорее всего, график зависимости

коэффициента теплопередачи от температуры при заливке сплава Al-3Si в форму из графита не совсем верный. В большинстве случаев максимальное значение коэффициента теплопередачи наблюдается при температуре ликвидуса или температуре близкой к ней. В то же время можно видеть, что ниже температуры 500 °С в формах из стали и графита коэффициент теплопередачи практически идентичен и составляет 200 Вт/м²К. Это связано с тем, что ниже этой температуры между слитком и формой формируется значительный зазор. Можно видеть, что максимальное значение коэффициента теплопередачи при заливке сплава Al-3Si в графитовую форму в 1,8 раза выше, чем при заливке этого сплава в стальную форму.

На рисунке 6,(б) представлена зависимость коэффициента теплопередачи от температуры поверхности слитка при заливке алюминиевого сплава Al-7Si в формы из ХТС, стали и графита. Как видно графики изменения коэффициента теплопередачи при литье в стальную, графитовую и форму из ХТС значительно отличаются. Максимальное значение коэффициента теплопередачи между отливкой и формой достигаются при температуре ликвидуса $T_L(612^\circ\text{C})$ для форм из ХТС и графита, и составляет 4700 Вт/м²К и 900 Вт/м²К соответственно. Для стальной формы максимальное значение коэффициента теплопередачи достигается чуть выше температуры ликвидуса сплава 640°С, и составляет 2050 Вт/(м²К). Таким образом максимальные значения коэффициента теплопередачи при заливке сплава в графитовую форму больше в 2,3 раза чем при заливке в стальную форму и в 5 раз, чем при литье в форму из ХТС. Значение коэффициента теплопередачи при температуре солидуса $T_S(552^\circ\text{C})$ составляет 2500 Вт/(м²К) при заливке сплава в графитовую форму, 600 Вт/(м²К) для формы из ХТС и 550 Вт/(м²К) для формы из стали. Таким образом при температуре солидуса значения коэффициента теплопередачи при литье сплава Al-7Si в графитовую форму примерно в 4 раза больше, чем при литье в формы из ХТС и стали.

Когда температура поверхности отливки ниже температуры солидуса сплава (500 °С) разница между коэффициентами теплопередачи при литье в

стальную и графитовую формы незначительна и их значение составляет 200 Вт/м²К. Коэффициент теплопередачи между сплавом и формой из ХТС имеет более высокое значение равное 600 Вт/м²К, и оно сохраняется до комнатной температуры. Это связано с тем, что для определения данного значения коэффициента теплопередачи использовались только 2 значения коэффициента теплопередачи: выше температуры ликвидуса и ниже температуры солидуса. В действительности возможно, что при низких температурах значение коэффициента теплопередачи между сплавом Al-7Si и формой из ХТС значительно ниже, и близко к значениям, полученным при заливке сплава в формы из графита и стали.

На рисунке б,(в) представлена зависимость коэффициента теплопередачи от температуры поверхности слитка, между сплавом Al-12Si и формами из графита и стали. Из графиков видно, что в отличие от сплавов Al-3Si и Al-7Si максимальное значение коэффициента для сплава Al-12Si достигается при одной и той же температуре поверхности отливки 570 °С и составляет 4700 Вт/м²К для графитовой формы и 2500 Вт/м²К для стальной формы. Таким образом максимальное значение коэффициента теплопередачи для графитовой формы в 1,8 раза больше, чем для стальной формы. При температуре солидуса сплава (T_s) 576 °С значения коэффициента теплопередачи составляют 3186 Вт/м²К для графитовой формы и 1500 Вт/м²К для стальной формы. Как указывалось ранее, это связано с тем, что критические точки где происходит резкое изменение коэффициента теплопередачи, не всегда точно совпадают с критическими температурами сплава (ликвидус и солидус). По всей видимости, на это влияют процессы, связанные с выделением теплоты кристаллизации. Также следует учитывать, что рассчитанные температуры ликвидуса и солидуса могут не в полной мере совпадать с экспериментальными. При уменьшении температуры поверхности слитка разница между коэффициентами теплопередачи графитовой и стальной формы уменьшается. Ниже 350 °С графики изменения коэффициента теплопередачи при заливке сплава Al-12Si в формы из стали и графита совпадают.

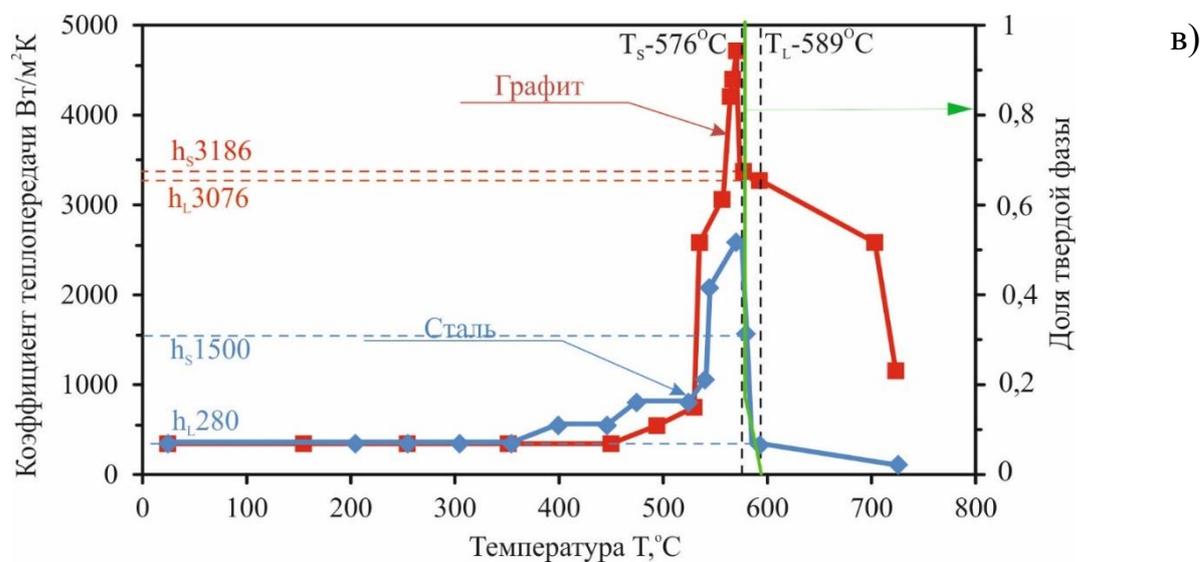
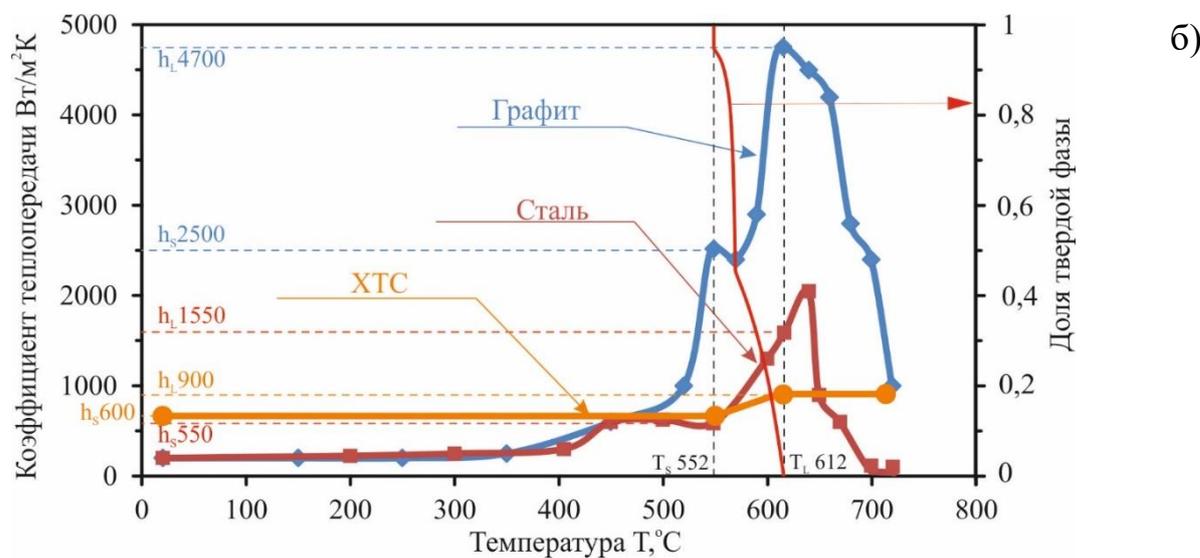
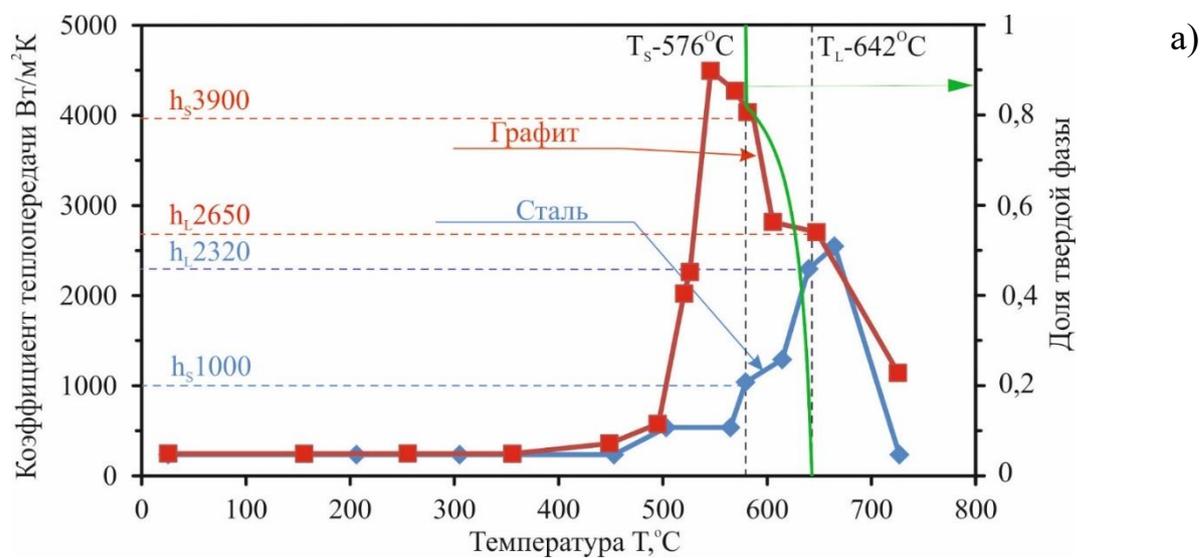


Рисунок 6 - Зависимость коэффициента теплопередачи и доли твердой фазы от температуры поверхности слитка для сплавов Al-3Si (а), Al-7Si (б), Al-12Si (в) в формы с различной скоростью охлаждения

На рисунке 7 представлена зависимость коэффициента теплопередачи от температуры поверхности слитка между магниевым сплавом МЛ5 и формами из ХТС, стали и графита. Максимальное значение коэффициента теплопередачи между слитком и формой из ХТС, графита и стали достигается при температуре близкой к ликвидусу сплава (T_L) 605°C и составляет $1200 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, $1490 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, $4720 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ соответственно. Для формы из графита максимальное значение коэффициента теплопередачи в 3,1 раза больше, чем для формы из стали и в 3,9 раза больше, чем для формы из ХТС. При температуре солидуса сплава (T_S) 406°C значения коэффициента теплопередачи примерно схожи для форм из ХТС и стали и составляют 500 и $450 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ соответственно. Для формы из графита это значение чуть выше и составляет $800 \text{ Вт/м}^2\text{К}$. При более низких температурах значения коэффициента теплопередачи между сплавом МЛ5 и формами из стали и графита сравниваются, а коэффициент теплопередачи между сплавом и формой из ХТС имеет более высокое значение равное $600 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, которое сохраняется до комнатной температуры. Аналогичная ситуация наблюдалась для сплава Al-7Si и связана с тем, что для определения данного значения коэффициента теплопередачи использовались только 2 значения коэффициента теплопередачи: выше температуры ликвидуса и ниже температуры солидуса и, в действительности, график изменения коэффициента теплопередачи при заливке сплава МЛ5 в форму из ХТС может иметь более сложный вид при низких температурах и не быть постоянным.

В целом можно видеть, что максимальное значение коэффициента теплопередачи вне зависимости от состава сплава при литье в графитовые формы составляет около $4500 - 4700 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, при литье в стальные формы $2000 - 2500 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ и $900 - 1200 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ при литье в формы из ХТС. То есть коэффициенты теплопередачи соотносятся как 1:2:4. По мере кристаллизации сплава значение коэффициента теплопередачи снижается для всех форм, и после её окончания значения коэффициентов теплопередачи для всех материалов формы схоже

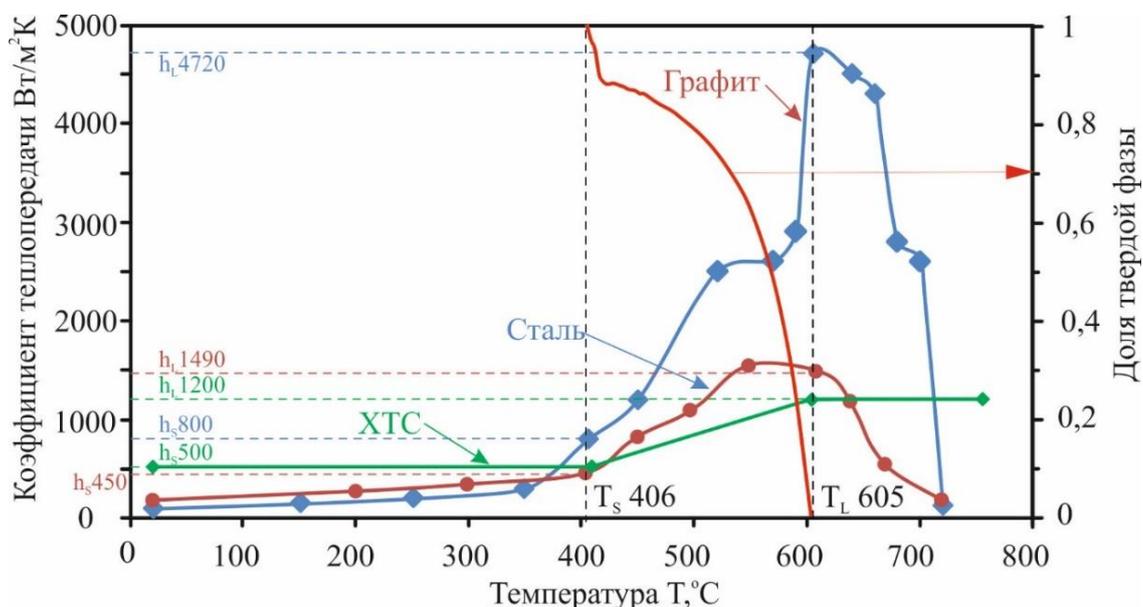


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента теплопередачи и доли твердой фазы от температуры поверхности слитка для сплава МЛ5 при заливке в формы из ХТС, стали и графита

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В ходе проведения экспериментов отработана методика снятия температурных полей в литейных формах из различных материалов (ХТС, стали и графита) и кривых охлаждения сплава при заливке цилиндрических слитков. Получены температурные поля и кривые охлаждения для экспериментальных сплавов Al-3Si, Al-7Si, Al-12Si, МЛ5, БрО8Ц4 и чистого алюминия А99. Предложена и опробована методика определения коэффициента теплопередачи между сплавом и литейной формой, основанная на сопоставлении экспериментальных и смоделированных с заданным значением коэффициента теплопередачи температурных кривых. Сопоставление осуществляется за счёт вычисления минимизации функции ошибок.

2. С использованием метода, описанного в п.1 были найдены температурные зависимости коэффициентов теплопередачи на границе слиток/форма при заливке сплавов Al-3Si, Al-7Si, Al-12Si, МЛ5, БрО8Ц4 и чистого алюминия А99 в формы из холоднотвердеющей смеси, стали и

графита, в широком диапазоне от температуры заливки до извлечения отливки из формы.

3. Были рассчитаны теплофизические свойства сплавов с помощью термодинамической базы программы ProCast и показано, что они достаточно хорошо коррелируют со свойствами, представленными для этих сплавов в литературе. Аналогичный анализ был сделан и для материалов формы, по результатам которого были выбраны наиболее адекватные теплофизические свойства, которые можно использовать для получения адекватных результатов компьютерного моделирования.

4. Анализ температурных зависимостей коэффициентов теплопередачи между алюминиевыми сплавами Al-3Si, Al-7Si Al-12Si и формами из стали и графита, удалось установить влияние интервала кристаллизации сплава на вид температурной зависимости коэффициента теплопередачи. В частности, для всех случаев характерно достижение максимального значения коэффициента теплопередачи при температуре поверхности слитка вблизи температуры ликвидуса сплава, далее по мере затвердевания и формирования зазора между слитком и формой значение коэффициента теплопередачи снижалось.

5. Показано, что при температуре поверхности слитка ниже температуры солидуса сплава значение коэффициента теплопередачи практически постоянное для всех сплавов.

6. При литье алюминиевых и магниевых сплавов в формы из графита стали и холоднотвердеющей смеси максимальные значения коэффициентов теплопередачи находятся в диапазонах 900-1200, 2000-2500 и 4500-4700 Вт/м²К, соответственно. Таким образом максимальная интенсивность передачи тепла при одинаковой разности температур между слитком и формой при литье в форму из ХТС в 2 раза ниже, чем при литье в стальную форму и в 4 раза ниже чем при литье в графитовую.

7. Обнаружено, что максимальные значения коэффициентов теплопередачи при литье различных сплавов в форму из одного и того же материала максимальное значение коэффициента теплопередачи практически не изменяется. Меняется только вид кривой в зависимости от температурного интервала кристаллизации сплава.

8. Показано, что использование значений коэффициентов теплопередачи, определенных в работе, повышает адекватность моделирования литейных процессов. Предложено использовать температурные зависимости коэффициентов теплопередачи для задач моделирования литейных процессов, что позволит достоверно прогнозировать образование недоливов, усадочных дефектов и термических напряжений.

Список опубликованных работ по теме диссертации.

1. Баженов В.Е., Колтыгин А.В., Целовальник Ю.В. Определение величины коэффициента теплопередачи между отливкой из сплава АК7ч (А356) и формой из холоднотвердеющей смеси // Изв. вуз. Цветная металлургия. 2016. № 5, С. 42–51.

2. Баженов В.Е., Колтыгин А.В., Целовальник Ю.В., Санников А.В. Моделирование процесса литья алюминия в форму из графита // Литейное производство. 2016. № 11, С. 31–33.

3. Баженов В.Е., Колтыгин А.В., Целовальник Ю.В., Санников А.В. Определение коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи для моделирования процесса литья алюминия в графитовые формы // Изв. вуз. Цветная металлургия. 2017. № 1, С. 40–52.

4. Баженов В.Е., Петрова А.В., Колтыгин А.В., Целовальник Ю.В. Определение коэффициента теплопередачи между отливкой из сплава МЛ5 (AZ91) и формой из холоднотвердеющей смеси // Цветные металлы. 2017. № 8, С. 89–96.

5. Bazhenov, V.E., Tselovalnik, Y.V., Koltygin, A.V., Belov, V.D. Investigation of the Interfacial Heat Transfer Coefficient at the Metal–Mold Interface During Casting of an A356 Aluminum Alloy and AZ81 Magnesium Alloy into Steel and Graphite Molds // International Journal of Metalcasting. 2021. 15(2), P. 625-637.