

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Сибирский федеральный университет»

На правах рукописи



**Потапенко Александр Сергеевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В УСТАНОВКЕ  
НЕПРЕРЫВНОГО СОВМЕЩЕННОГО ЛИТЬЯ И ПРЕССОВАНИЯ  
ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ**

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
Скуратов Александр Петрович

Красноярск – 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ПРОБЛЕМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЛИННОМЕРНОЙ ПРОДУКЦИИ.....	10
1.1 Современные процессы и установки непрерывного литья и обработки металлов давлением.....	11
1.2 Особенности теплотехнологии совмещенного непрерывного литья и прессования цветных металлов.....	21
1.3 Методы теплового расчета и моделирования процессов непрерывного литья и прессования металлов.....	26
1.4 Выводы и постановка задачи исследования.....	42
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ УСТАНОВКЕ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ КРИСТАЛЛИЗАТОРОМ.....	44
2.1 Конструкция и принцип работы установки.....	45
2.2 Методика экспериментального исследования и используемое оборудование.....	51
2.3 Анализ результатов экспериментальных исследований процессов нестационарного теплообмена.....	56
2.4 Выводы по главе 2.....	62
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛООБМЕНА В УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ПРЕССОВАНИЯ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ КРИСТАЛЛИЗАТОРОМ.....	64
3.1 Особенности построения расчетной сетки и доменов в модели.....	64
3.2 Принятые уравнения и краевые условия в модели.....	69
3.3 Методика задания краевых условий в расчетных доменах.....	80
3.4 Разработка компьютерной модели для проведения инженерных расчетов.....	86

3.5 Выводы по главе 3.....	87
ГЛАВА 4 ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ЛИТЬЕ И ПРЕССОВАНИИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ.....	89
4.1 Анализ динамики теплообмена при литье-прессовании алюминиевых сплавов в переходном режиме работы установки.....	89
4.2 Исследование теплообмена при различной температуре разливки.....	97
4.3 Выводы по главе 4.....	118
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА СИСТЕМЫ ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ УСТАНОВКИ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ КРИСТАЛЛИЗАТОРОМ.....	121
5.1 Разработка конструкции установки с водяным охлаждением.....	122
5.2 Компьютерная модель установки с принудительным охлаждением элементов.....	124
5.3 Отработка рационального режима водяного охлаждения элементов установки.....	129
5.4 Разработка устройств терморегулирования и управления тепловым режимом.....	133
5.5 Выводы по главе 5.....	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	141
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	144
ПРИЛОЖЕНИЕ А Результаты экспериментального исследования.....	161
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акты об использовании результатов работы.....	164
ПРИЛОЖЕНИЕ В Результаты моделирования .....	167

## **ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность работы.** Установки, реализующие энерго- и ресурсосберегающую технологию совмещения операций непрерывного литья и обработки давлением, имеют разнообразные конструкции, основным элементом которых является кристаллизатор, как правило, роторного типа. Одной из новых конструкций, разработанной отечественными учеными и имеющих ряд технологических преимуществ относительно зарубежных аналогов, является установка с горизонтальным карусельным кристаллизатором. Однако на сегодняшний день не создано промышленных образцов установки с горизонтальным кристаллизатором, которые бы надежно эксплуатировались на рынке производства прессовой продукции. Связано это с тем, что начальный период работы после пуска установки (переходный процесс) характеризуется нестационарным тепловым состоянием ее элементов, оказывающим существенное влияние на температурно-временные условия затвердевания металла.

Очевидная перспективность процесса непрерывного совмещенного литья и прессования цветных металлов в установке с горизонтальным кристаллизатором требует его скорейшего внедрения в отечественную промышленность. Вместе с тем, в настоящее время нет научно обоснованной теоретической базы для проектирования рациональной конструкции и режимов работы установки, обеспечивающих стабилизацию температурных условий процесса затвердевания жидкого металла и дальнейшего его прессования.

### **Степень разработанности темы исследования**

Степень разработанности темы исследования недостаточна. В частности, отсутствуют математические модели теплообмена, позволяющие провести детальные теоретические исследования температурно-временных зависимостей с учетом конструктивных особенностей установки с горизонтальным кристаллизатором, а также влияния на динамику

теплообмена внешних факторов, сопровождающих процесс литья-прессования алюминиевых сплавов различного состава.

**Объект исследования** – установка непрерывного совмещенного литья и прессования цветных металлов с горизонтальным карусельным кристаллизатором.

**Предмет исследования** – процессы нестационарного теплообмена.

**Цель работы** – совершенствование тепловых процессов в установке непрерывного совмещенного литья и прессования алюминиевых сплавов с горизонтальным карусельным кристаллизатором (НСЛиП с ГК) на основе результатов экспериментального и теоретического исследования теплообмена.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Провести экспериментальное исследование особенностей переходных тепловых процессов в опытно-промышленном образце установки НСЛиП с ГК.

2. Разработать компьютерную модель процесса нестационарного теплообмена в опытно-промышленном образце установке НСЛиП с ГК.

3. Провести численный анализ теплообмена в переходных режимах работы установки НСЛиП с ГК алюминиевых деформируемых сплавов.

4. Разработать рекомендации по совершенствованию теплового процесса в установке НСЛиП с ГК, обеспечивающего в переходных режимах требуемый по технологии для данной марки алюминиевого сплава диапазон температур в контрольных сечениях до и после зоны прессования.

**Научная новизна работы:**

1. Разработана компьютерная модель нестационарного тепломассопереноса в установке непрерывного совмещенного литья и прессования цветных металлов с карусельным горизонтальным кристаллизатором, система уравнений и краевые условия в которой учитывают реальную геометрию элементов, систему их охлаждения,

движение кристаллизатора и охлаждающего агента, образование теплоты при фазовом переходе и прессовании металла.

2. Установлены количественные температурно-временные зависимости при затвердевании алюминиевых расплавов различного состава в переходном тепловом режиме, заключающиеся в следующем:

– показано, что разогрев кристаллизатора увеличивает несимметричность температурного поля расплава, которое вблизи инструмента прессования (дугообразного сегмента) характеризуется сдвигом области с максимальной температурой к поверхности кристаллизатора;

– определена зависимость продолжительности переходного процесса и скорости затвердевания расплава от температуры его перегрева и темпа разогрева кристаллизатора;

– определен максимальный температурный предел перегрева алюминиевых расплавов, при превышении которого металл попадает под инструмент прессования в жидкой фазе, что требует организации принудительного охлаждения элементов установки.

3. Разработаны рациональные режимы интенсивности водяного охлаждения кристаллизатора и инструмента прессования при обработке алюминиевого сплава АК12 в нестационарных и установившихся условиях работы установки.

#### **Теоретическая значимость работы:**

– с использованием результатов экспериментального и численного исследования изучена теория тепловой работы установки НСЛиП с ГК алюминиевых сплавов в переходных режимах ее работы;

– разработана система принудительного охлаждения установки НСЛиП с ГК, позволяющая путем контролируемого отвода избыточного количества образующейся теплоты в различных режимах ее эксплуатации обеспечить при достижении зоны прессования среднюю по сечению оптимальную для данной марки алюминиевого сплава температуру (интервал температур) деформирования.

### **Практическая значимость:**

– разработана двухзонная система принудительного водяного охлаждения установки, позволяющая обеспечить оптимальный диапазон температур затвердевающего расплава перед зоной прессования.

– разработана установка терморегулирования для непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов;

– разработано устройство управления тепловым режимом работы установки непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов (Патент РФ №2657396);

– предложена тепловая защита подшипников кристаллизатора, обеспечивающая поддержание их рабочей температуры на уровне, не превышающем максимально допустимые значения в процессе эксплуатации установки;

– разработана математическая модель и программа инженерного расчета на ЭВМ температуры кристаллизующегося расплава цветных металлов в ручье колеса установки Конформ-Кастэкс (свидетельство о регистрации программы № 2017614574);

– разработанные математические модели могут быть использованы при проектировании новых и модернизации действующих конструкций установок НСЛиП с ГК цветных металлов и сплавов;

– научные и практические результаты работы используются в СФУ при подготовке бакалавров и магистров по направлению подготовки «Теплоэнергетика и теплотехника».

### **Защищаемые научные положения:**

1. Компьютерная модель теплообмена в установке НСЛиП с ГК цветных металлов и сплавов.

2. Результаты экспериментального и теоретического исследования процессов теплопереноса в установке НСЛиП с ГК алюминиевых сплавов.

3. Рекомендации по рациональным конструкции и режимным параметрам работы установки НСЛиП с ГК алюминия и алюминиевых сплавов.

**Методы исследований** состояли в проведении экспериментов на опытно-промышленной установке НСЛиП с ГК с применением стандартных сертифицированных средств измерения. Численные исследования проводились с использованием разработанной компьютерной модели теплообмена, построенной на базе лицензионного программного продукта ANSYS CFX.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов компьютерного моделирования и экспериментальных данных.

**Личный вклад автора.** Все приведенные в диссертации основные положения, экспериментальные и теоретические результаты, а также выводы получены лично автором или при его непосредственном участии. При постановке исследований и анализе их результатов использовались консультации Ю.В. Горохова.

**Апробация работы.** Основные результаты исследования, изложенные в диссертации, докладывались и были представлены на: Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: проспект Свободный» (г. Красноярск, 2014-2017), VI Международном конгрессе «Цветные металлы и минералы» (г. Красноярск, 2014), XXV международной научно-практической конференции «Достижения вузовской науки» (г. Новосибирск, 2016), III Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки и техники» (г. Самара, 2016), IV Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) «Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах» (г. Новокузнецк, 2016), II Международной научно-практической конференции



«Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности» (г. Екатеринбург, 2017).

**Публикации по работе:** по теме диссертации опубликовано 18 научных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи, индексируемые в научной базе Scopus, 1 патент РФ на изобретение и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами, заключения, списка использованных источников из 143 наименований. Работа изложена на 186 страницах, содержит 2 таблицы и 124 рисунка.

## **ГЛАВА 1 ПРОБЛЕМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЛИННОМЕРНОЙ ПРОДУКЦИИ**

Процессы обработки цветных металлов и сплавов включают в основном такие основные металлургические переделы, как литье заготовки, пластическую деформацию и термообработку. Несмотря на высокий уровень механизации и автоматизации на каждом переделе, данным методам получения металлоизделий из слитков присущи значительные затраты энергии на нагрев слитков перед пластической деформацией, высокая металлоемкость прессового оборудования и мощных прокатных станов, необходимость наличия больших производственных площадей, обслуживающего персонала и т.д.

Одной из основных тенденций развития металлургической отрасли является совмещение этих переделов в одну непрерывную технологическую линию, лишенную отмеченных недостатков [1]. Решению этой проблемы, начиная с середины XIX в., посвящены работы многих металлургов-обработчиков: Г. Бессемера, Г. Александера, Д. Грина, Т. Авитцура, Д. Проперци. В последние годы специалистами таких организаций, как «Гипроцветметобработка», «ВНИИМетМаш», «ВИАМ» и ряда других, разработаны и внедрены в промышленность агрегаты непрерывного литья и прокатки, бесслитковой прокатки ленты, что, несомненно, явилось значительным достижением отечественной металлургии [2]. Однако наряду с очевидной перспективностью применения процессов непрерывного литья и прокатки в настоящее время продолжают исследовательские работы, направленные на разработку более эффективных и гибких технологических линий по совмещению непрерывного литья и обработки металлов давлением.

Решение вопросов энерго- и ресурсосбережения в современных отраслях металлургической и машиностроительной промышленности требует внедрения современных методов сварки черных и цветных металлов.

Так, например, сварка алюминиевой проволокой широко применяется в машиностроении, строительстве и целом ряде других отраслей. Дальнейшее же развитие сварочных технологий сдерживается недостаточными объемами производства качественной сварочной алюминиевой проволоки [3].

Один из наиболее перспективных способов получения сварочной проволоки является – непрерывное литье и прессование цветных металлов, позволяющее повысить технико-экономические показатели изготовления мелкосортной продукции по сравнению с традиционным способом прессования на горизонтальных гидравлических прессах. Работу над решением этой проблемы стимулирует создание и широкое распространение в последние годы технологических линий непрерывного прессования цветных металлов [4].

### **1.1 Современные процессы и установки непрерывного литья и обработки металлов давлением**

На сегодняшний день для получения слитков и дальнейшей их обработки давлением используют непрерывное литье, при котором слиток может быть получен любой требуемой длины. При этом кристаллизатор остается неподвижным, а слиток вытягивается с заданной скоростью. Уровень жидкого металла в кристаллизаторе поддерживается постоянным, а отлитый слиток режется на мерные заготовки специальными устройствами, двигающимися синхронно со скоростью вытягивания слитка.

Полунепрерывное литье, отличается от непрерывного тем, что оно ведется непрерывно только до получения слитка заданной длины, после чего литье прекращается, слитки извлекаются и цикл повторяется. Данный тип литья удобен при производстве мелкосерийной продукции, имеющей относительно небольшое поперечное сечение. Российскими учёными разработана горизонтальная машина полунепрерывного литья заготовок для мелкосерийного производства (ГМПЛЗ) представленная на (рис 1.1) [5].

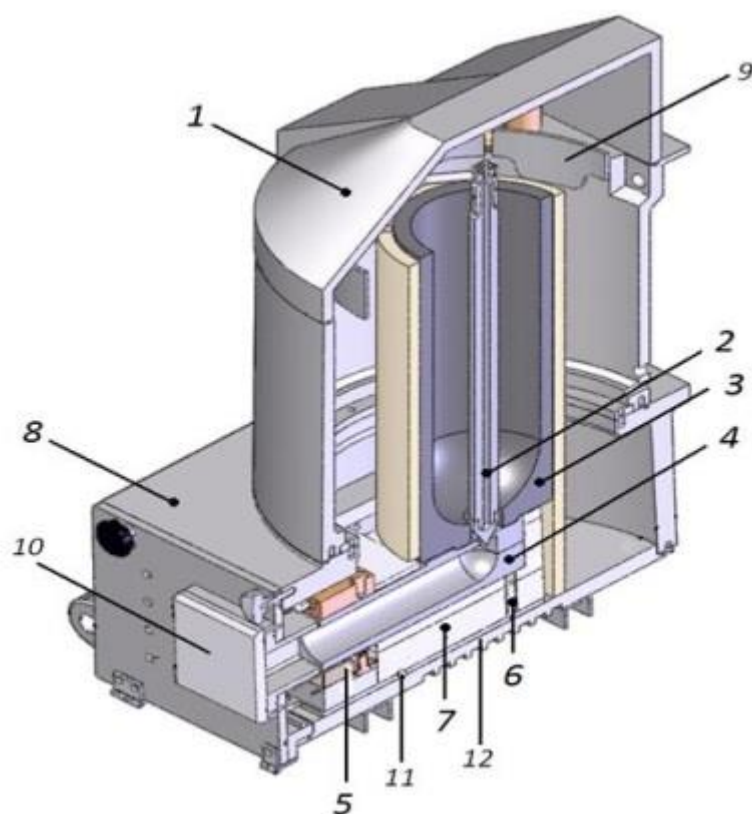


Рис. 1.1. Плавильная и охлаждающая части машины ГМПЛЗ:  
 1 – крышка корпуса индуктора; 2 – шток; 3 – графитовый тигель;  
 4 – графитовый кристаллизатор; 5 – охлаждающее устройство;  
 6 – керамические втулки; 7 – изоляционный материал; 8 – камера кристаллизатора; 9 – подъемное устройство; 10 – смотровая крышка; 11 – салазки; 12 – дно корпуса

Авторами конструкции данной установки разработан соединительный узел тигля с кристаллизатором, позволяющий создать надежное соединение двух элементов в ходе подготовки машины к началу процесса литья и предотвратить вытекание расплавленного материала в камеру кристаллизатора. Сконструировано вытяжное устройство, осуществляющее контролируемую вытяжку всего разливаемого сортамента по заранее выбранной программе. Кристаллизатор выполнен с внутренней рабочей полостью, обеспечивающей равномерный теплоотвод от всех граней отливаемой заготовки. Также представлена конструкция охлаждающего устройства, служащего для выравнивания температуры заготовки, как по ее толщине, так и по ширине, что позволяет получить равномерную структуру изделий [5].

Процесс непрерывного литья осуществляется следующим образом (рис. 1.2).

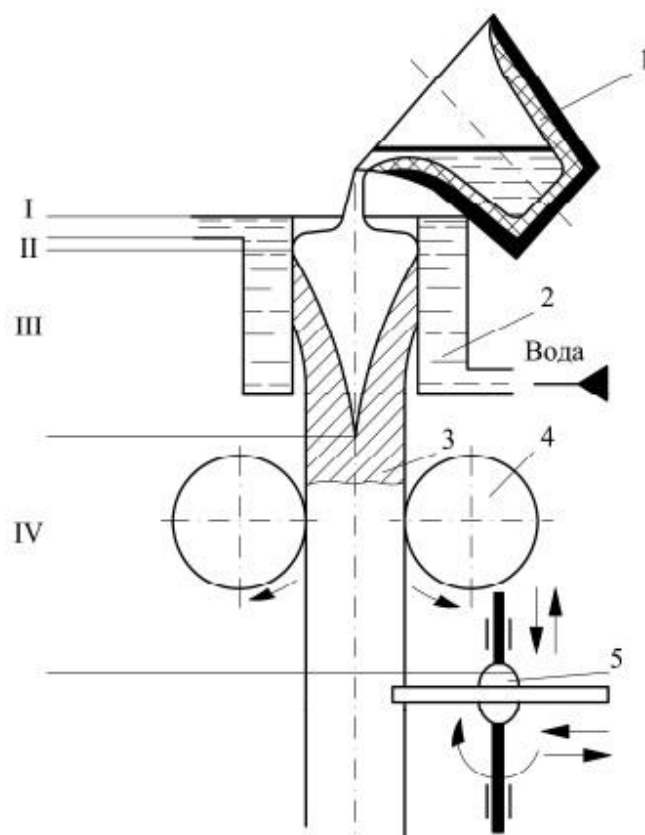


Рис.1.2. Схема непрерывного литья:  
1 – ковш, 2 – кристаллизатор, 3 – затвердевшая часть расплава,  
4 – валки, 5 – резак, I – IV – зоны охлаждения

Расплав равномерно и непрерывно подается в водоохлаждаемый кристаллизатор. Затвердевшая часть слитка непрерывно извлекается валками или опускается под действием собственного веса. Особенности процесса формирования непрерывной отливки обусловлены тем, что в кристаллизаторе в разных его зонах по высоте в каждый момент одновременно происходят все последовательные стадии охлаждения и затвердевания расплава: I – заполнение кристаллизатора расплавом; II – отвод теплоты перегрева; III – кристаллизация; IV – охлаждение слитка [6].

Широкое распространение в отечественном производстве продукции из черных металлов получила машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), схема которой представлена на (рис.1.3) [7-9].

В данной конструкции жидкий металл непрерывно заливается в охлаждаемый кристаллизатор непосредственно из ковша или через промежуточное устройство. При этом в кристаллизатор предварительно вводят затравку одинакового поперечного сечения, что и у слитка. В процессе затвердевания отливаемая заготовка вытягивается вниз при помощи использования тянущих механизмов.

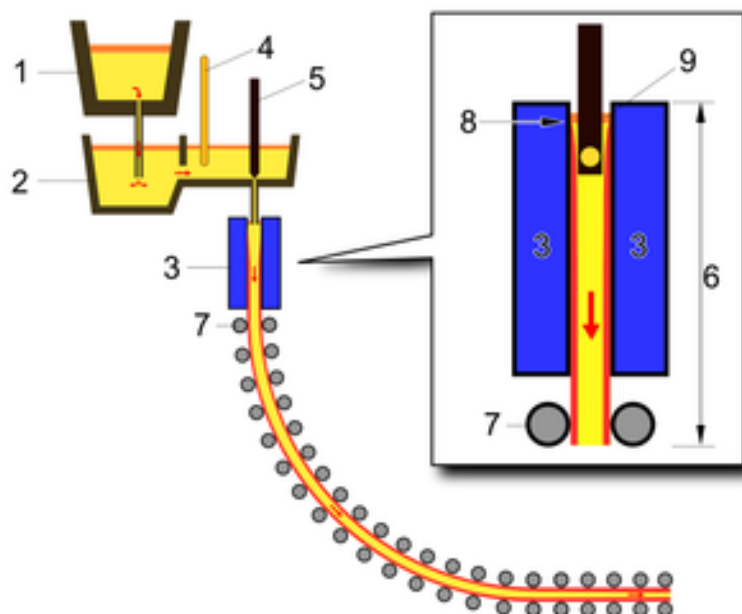


Рис. 1.3. Схема установки непрерывного литья заготовок:  
1 – ковш подачи жидкого металла; 2 – промежуточный ковш;  
3 – кристаллизатор; 4 – заслонка; 5 – стопор; 6 – зона кристаллизации;  
7 – тянущие ролики; 8 – зона начала кристаллизации;  
9 – подача охлаждающей воды

К основным технико-экономическим преимуществам МНЛЗ следует отнести:

- небольшой расход металла на тонну готовой продукции;
- уменьшение отходов донной и головной частей слитков;
- малые капитальные и эксплуатационные затраты;
- механизация и автоматизация технологического процесса.

Основными недостатками установки МНЛЗ являются затруднение изготовления отливок сложной конфигурации, а также ограниченная номенклатура отливок и заготовок [9].

Наиболее прогрессивным процессом обработки металлов давлением, позволяющим получать деформированные изделия, является прессование. Широкое развитие прессования объясняется благоприятной схемой напряженного состояния деформируемого металла – всесторонним неравномерным сжатием [2, 10, 11].

Существует достаточно большое количество схем прессования, но основными из них следует считать прямое и обратное [6]. При прямом прессовании направление выдавливания изделий совпадает с направлением движения пресс-штампеля. При обратном прессовании истечение металла в матрицу происходит в направлении, противоположном движению пресс-штампеля.

В настоящее время прессованием получают несколько десятков тысяч наименований пресс-изделий из различных металлов и сплавов. При этом процесс ведут в широком интервале температур, выбор которых определяется, главным образом, величиной сопротивления деформации. Горячее прессование более распространено, чем холодное [10]. При этом область применения последнего расширяется для металлов и сплавов, имеющих невысокое сопротивление деформации. Прессование организовано как периодически повторяющийся процесс, однако в настоящее время нашли промышленное применение способы прессования в непрерывном и полу - непрерывном режимах.

Для реализации ряда непрерывных процессов производства длинномерной продукции в качестве базового процесса применяется прокатка, основным преимуществом которой является возможность осуществления с помощью вращающихся валков непрерывного процесса деформации [11, 12].

Полунепрерывное прессование в настоящее время является одной из основных схем производства широкой номенклатуры пресс-изделий из алюминиевых сплавов. При этом его характерной чертой является использование форкамерного инструмента, что позволяет осуществлять прессование со стыковой сваркой и натяжением [13]. В качестве основного оборудования для реализации таких технологий применяются горизонтальные прессы, основными параметрами которых являются большое номинальное усилие, размеры контейнера, ход и скорость движения прессующей траверсы. Основной тенденцией развития гидропрессового оборудования является применение автоматизированных линий, оснащенных тянущими устройствами, новыми системами передачи продукции [4].

В настоящее время наиболее распространена схема прямого прессования на гидравлических прессах вследствие относительной простоты ее осуществления и возможности изготовления профилей, панелей, прутков и труб практически любой конфигурации с высоким качеством поверхности. Однако из-за существенного сопротивления действия сил трения в контейнере процесс характеризуется значительной неравномерностью течения металла, ограничивающей предельные скорости истечения, что снижает производительность прессовых установок, приводит к получению изделий с неоднородной структурой и снижению выхода годной продукции [4]. Но в существующих способах прессования на гидравлических прессах после каждого цикла прессования остаются отходы металла в виде прессостатка, а цикличность приводит к снижению производительности процесса.

В работах [14,15] рассмотрены возможные схемы прессования с использованием сил трения на контакте деформируемого металла с элементами матричного узла (рис. 1.4): продольное прессование через валковую матрицу с принудительным вращением (а); углового прессования через матрицу, образованную принудительно вращаемым валком и калибрующей кромкой контейнера (б); бокового прессования через матрицу,



образованного торцевой плитой трения и калибрующей кромкой контейнера (в). Схема (а) опробована в промышленных условиях [16], а схемы (б) и (в) нашли неполное применение в машинах и процессах Conform и Linex, а также в [17].

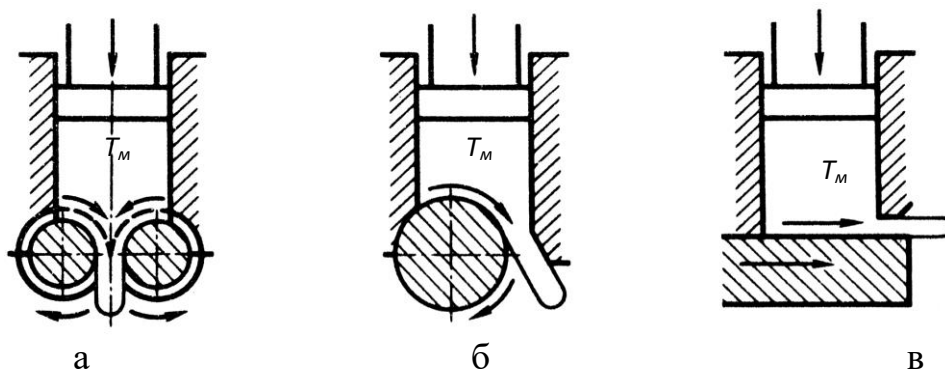


Рис.1.4. Прессование с активным действием сил трения:  
а – со стороны валковой матрицы; б – одного валка, в – плиты трения

В последние годы получили развитие технологии и оборудование непрерывного прессования, которые позволяют решать некоторые из указанных проблем путем реализации необходимой степени деформации в одном узле – узле непрерывного деформирования. При этом, наряду с основным видом обработки – прессованием, в очаге деформации в зависимости от вида непрерывного прессования могут совмещаться такие операции, как прокатка, осадка, раздача и др. Основными способами непрерывного прессования являются Conform, Linex и Extrolling. В работах [10-12] приведен анализ технологии и оборудования непрерывного прессования, а также результаты исследований в этой области.

Наибольшее распространение в промышленности получил способ Конформ, предложенный Д. Грином [18] в 1970 г (запатентован United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA) в 1971 году, патент № 1370894 GB). Способ Конформ, схема которого приведена на рис. 1.5, основан на применении подвижного вращающегося инструмента в виде колеса с врезанной канавкой и примыкающего к нему неподвижного инструмента, называемого башмаком, причем в торце башмака установлена матрица,

которая перекрывает канавку колеса. В качестве заготовки используется пруток 7, который подается в ручей 2, выполненный на рабочем колесе 1 в виде кольцевой канавки и с внешней стороны закрытый прижимным башмаком 3, на внутренней поверхности которого выполнен выступ 4, охватывающий заготовку 7. В башмаке 3 закреплен блок инструмента с прессовой матрицей 5.

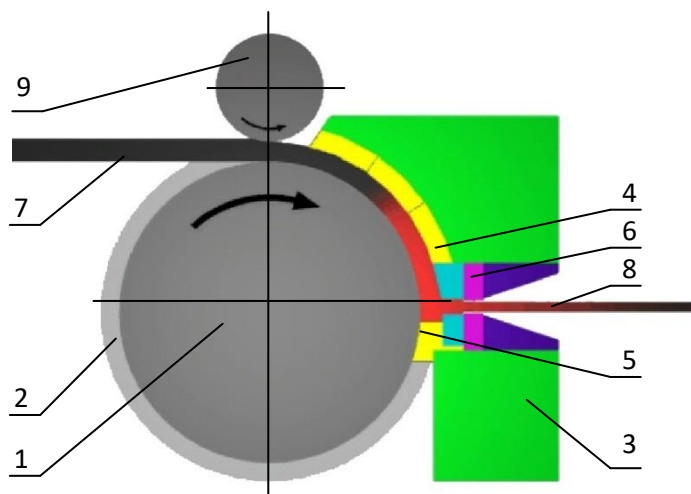


Рис. 1.5. Принципиальная схема реализации процесса непрерывного прессования по способу Конформ [19]:

1 – рабочее колесо, 2 – кольцевая канавка, 3 – башмак, 4 – кольцевая вставка, 5 – вставка, 6 – матрица, 7 – заготовка, 8 – изделие, 9 – валок

При подаче прутковой заготовки в зазор между башмаком и колесом, она продвигается в камеру прессования, образуемую поверхностями башмака и канавки, под действием сил трения по поверхности контакта с вращающимся колесом и достигает матрицы. В зоне, непосредственно перед матрицей заготовка подвергается интенсивному пластическому деформированию («раздавливанию») за счет которого разогревается до высоких температур и заполняет всё сечение канавки (зона захвата при выдавливании); это способствует увеличению сил трения между поверхностью канавки и заготовкой. При вращении колеса силы трения от стенок канавки создают в заготовке продольные силы, необходимые для выдавливания материала заготовки через отверстие в матрице. Зона неполного контакта заготовки с поверхностью канавки (зона первичного

захвата) служит для развития давления, необходимого для пластического деформирования материала и заполнения объема в зоне перед матрицей. В качестве заготовки можно использовать обычную проволоку, причем процесс ее деформирования – втягивание в камеру прессования по мере поворота колеса, предварительное профилирование и заполнение канавки в колесе, создание рабочего усилия и, наконец, прессование - идет непрерывно, т.е. реализуется технология непрерывного выдавливания. Данный способ позволяет выдавливать пресс-изделия, как в направлении вращения рабочего колеса (тангенциальный способ), так и в направлениях, параллельных оси рабочего колеса (радиальный способ) [11].

Фирмы Outokumpu Holton Ltd. (ранее Holton Machinery Ltd.) и BWE Ltd. (ранее Babcock Wire Equipment) [20, 21] выпускают промышленные установки непрерывного прессования по способу Конформ, работающие в комплексе с литейными кристаллизаторами роторного типа. Установки достаточно компактны и позволяют получать различные пресс-изделия из меди и алюминия (рис. 1.6).



Рис. 1.6. Установка CONFORM™ 400 компании BWE Ltd [20, 21]

Мощность привода установки Holton Conform™ C400H фирмы Outokumpu Holton Ltd. с диаметром колеса 400 мм составляет 150 кВт. На установках нового поколения изготавливают секторные провода для кабеля с

поперечным сечением до 600 мм<sup>2</sup>, электропроводящие шины различной формы и размеров, трубы всех типов для систем охлаждения диаметром от 3 до 55 мм. Главным параметром, по которому классифицируются установки Конформ, является диаметр рабочего колеса, например, у компании BWE Ltd. – 285, 315, 350, 400 и 550 мм; Outokumpu Holton Ltd. – 300, 400 и 500 мм.

На сегодняшний день отечественные учёные активно работают над созданием эффективных и экономичных установок, работающих по способу Конформ. В статье [22] авторы рассматривают модернизированный способ непрерывного прессования на установке Мульти-РКУП-Конформ.

Процесс Экстроллинг был предложен и запатентован Б. Авитцуром в 1976 году и представляет собой способ совмещения процессов прокатки и прессования в одном очаге деформации [11]. Характеризуется тем, что за счет активных сил контактного трения между валками и заготовкой, выдавливание осуществляют через прессовую матрицу. Схема процесса показана на (рис. 1.7).

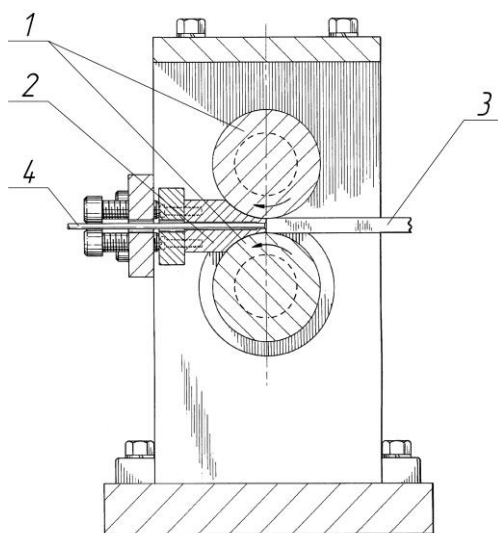


Рис. 1.7. Схема комбинирования прессования с прокаткой Экстроллинг (пат. № 3934446 US):  
1 – рабочие валки; 2 – матрица; 3 – заготовка; 4 – изделие

Для осуществления процесса исходная заготовка непрерывно подается в калибр, обжимается в нем, что полностью соответствует стадии прокатки и

выдавливается в калибрующее отверстие матрицы, установленной на выходе из калибра. Данный способ реализуется, как в холодном состоянии, так и при повышенных температурах и имеет меньшие потери мощности на трение реактивного действия, а также более эффективное заполнение полости калибра металлом заготовки. Рассматриваемый процесс сочетает в себе низкие потери на трение и малую продолжительность обработки, характерные для прокатки, с высоким единичным обжатием, возможным при прессовании. Недостатки прокатки (небольшое единичное обжатие) и прессования (ограниченная длина получаемого изделия) при такой реализации процесса могут быть устранены [2, 10, 11].

## **1.2 Особенности теплотехнологии совмещенного непрерывного литья и прессования цветных металлов**

В условиях постоянного технологического развития и глобализации рынков перед предприятиями, производителями металлопродукции, остро стоит проблема повышения эффективности производства и обеспечения выпуска конкурентоспособной продукции. Особенно актуальна эта проблема при производстве длинномерных изделий из цветных металлов и сплавов в виде прутков, проволоки и профилей малого поперечного сечения. Решение этой проблемы требует, как дальнейшего совершенствования действующих технологических процессов производства длинномерной продукции, так и создания технологических систем на базе интегрированных и совмещенных устройств и агрегатов, основанных на сокращении до минимума числа этапов технологического процесса, снижении затрат материальных и энергетических ресурсов. При решении этой проблемы сокращается количество промежуточных технологических операций, более эффективно используется внутреннее тепло отлитых заготовок, уменьшаются потери металла от угара при его нагреве в печах и при резке заготовок.

Проведенный анализ современных тенденций развития совмещенных

непрерывных процессов литья и обработки металлов давлением показал, что одним из эффективных методов производства сварочной алюминиевой проволоки является совмещенный непрерывный процесс литья и прессования методом Конформ. Поэтому в данном разделе рассмотрим устройства, разработанные на базе двух непрерывных процессов.

В 1856 году Генри Бессемер запатентовал литейную машину для получения тонких стальных полос непосредственно из жидкой стали [23] (рис. 1.8).

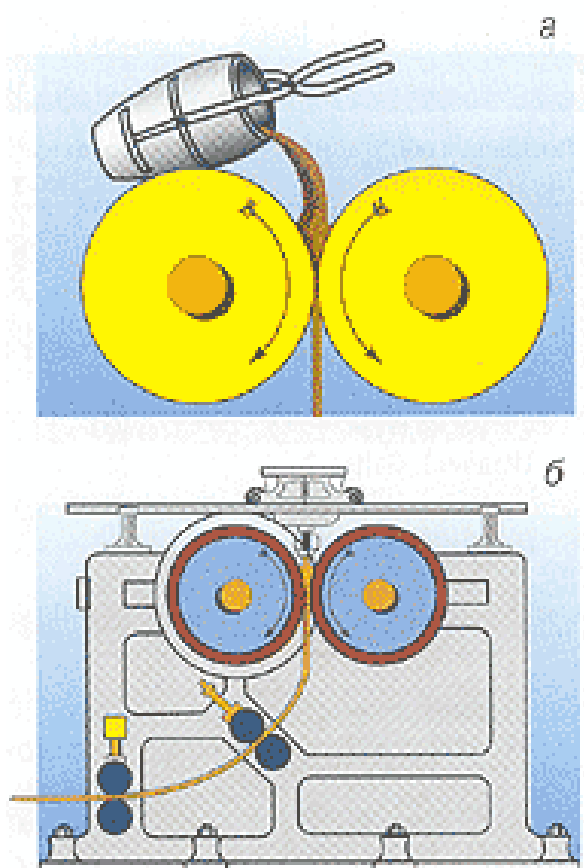


Рис. 1.8. Эскиз (а) и конструкция (б) установки Г. Бессемера

С тех пор металлурги во всем мире стремились реализовать этот процесс, и были предприняты многочисленные попытки производить цветные и черные металлы методом непрерывного литья. Большая часть этих попыток окончилась неудачей из-за трения скольжения между начальной

затвердевшей поверхностью слитка и поверхностью формы, что приводило к разрыву и вытеканию расплавленного металла на эту поверхность [24].

Первый агрегат, совмещающий в себе непрерывный процесс литья и прессования, был разработан с использованием машины Конформ, оснащенной элементами роторного кристаллизатора Иларио Проперци [25]. Этот способ изготовления пресс-изделий запатентован в Англии под названием Castex [26]. Схема процесса непрерывного литья и прессования Conform-Castex представлена на (рис.1.9).

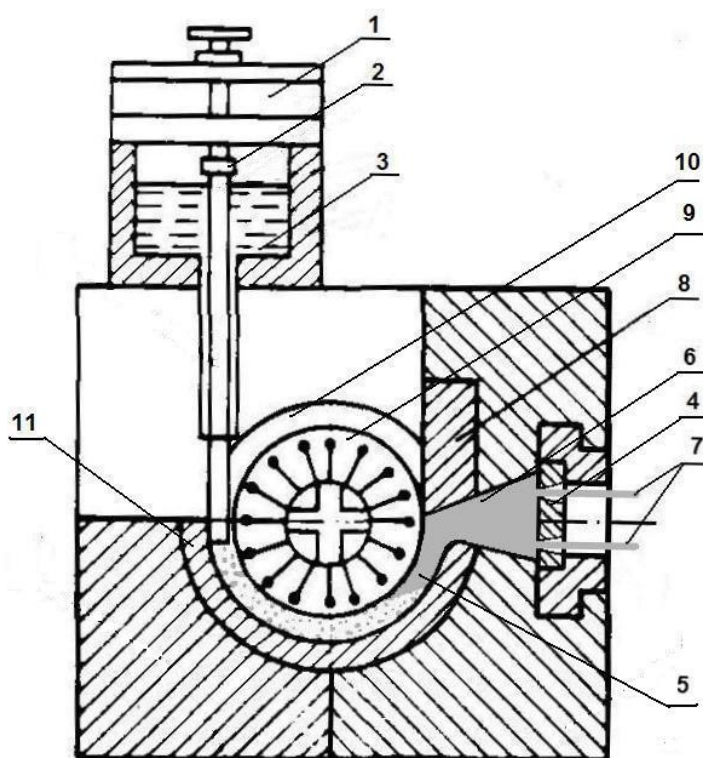


Рис. 1.9. Схема процесса непрерывного прессования Conform-Castex полых профилей из жидкого металла:

- 1 – дозатор; 2 – устройство регулирования расхода жидкого металла;
- 3 – жидкий металл; 4 – матрица; 5 – фронт кристаллизации;
- 6 – камера сварки; 7 – полые профили; 8 – упор; 9 – колесо;
- 10 – кольцевая канавка; 11 – кольцевая вставка

Перед началом процесса металл должен отвердеть и накопиться в камере прессового башмака, закрывающего всю нижнюю половину колеса-кристаллизатора, где создастся достаточно высокое давление для выпрессовывания металла через матрицу. Расплавленный металл подводится

через литейный ручей с регулятором наполнения и поступает в канавку колеса, имеющего интенсивное внутреннее охлаждение. В результате охлаждения происходит непрерывное затвердевание металла в нижней части и по бокам ручья. Твердый металл собирается перед упором, останавливается и отпрессовывается по способу Conform. Очень важно, чтобы процесс затвердевания металла не захватил зону прессования, а происходил только в нижних слоях и по бокам ручья. Высокая скорость затвердевания позволяет получить хорошие металлургические свойства полуфабрикатов.

Способ непрерывного литья и прессования Conform-Castex, при котором жидкий металл заливается в установку, является самым экономичным способом получения стандартной проволоки или профилей из всех других способов изготовления аналогичных изделий из твердого металла путем деформации [35]. Стабильность и устойчивость процесса непрерывной кристаллизации жидкого металла и его прессования, во многом зависят от эффективной работы системы непрерывной подачи расплавленного металла в канавку рабочего колеса. Она должна отвечать следующим требованиям:

- расплавленный металл не затвердевает в начальной фазе процесса;
- скорость перемещения расплавленного металла постоянна и соответствует скорости его затвердевания, определяемой интенсивности теплоотвода от прессового инструмента;
- в потоке расплавленного металла должна быть исключена турбулентность.

Использование данной установки вызывает затруднения в соблюдении этих требований, в частности, в стабилизации подачи металла в инструмент, вследствие «намораживания» жидкой фазы расплава при затвердевании на входную часть неподвижной кольцевой вставки [11].

Устранение этого недостатка возможно при совмещении непрерывного прессования с непрерывным литьем металла на установке с вертикальной осью вращения колеса-кристаллизатора карусельного типа для производства сварочной алюминиевой проволоки, разработанной сотрудниками кафедр



«Обработки металлов давлением» и «Литейное производство» ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» [27-31]. На (рис. 1.10) приведена схема опытно-промышленного образца установки с ГК [11].

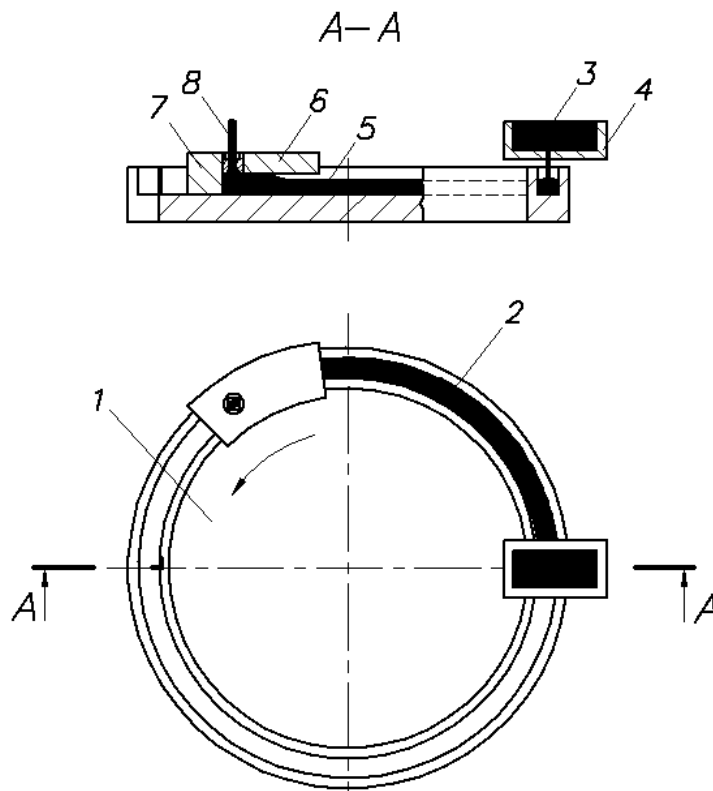


Рис.1.10. Схема установки непрерывного литья-прессования с вертикальной осью вращения колеса [11]:

1 – колесо-кристаллизатор; 2 – ручей; 3 – жидкий металл; 4 – литниковая коробка; 5 – слиток; 6 – матрицедержатель; 7 – матрица; 8 – пресс-изделие

Жидкий металл 3 заливается через дозатор 4 в ручей 2 вращающегося рабочего колеса 1 и затвердевает до входа в камеру прессования, образованную на участке сопряжения ручья с дугообразным сегментом 6. Слиток 5, поступающий в камеру прессования, выдавливается в отверстие матрицы 7 в виде пресс-изделия. Процесс заливки жидкого металла в канавку, его затвердевание и прессование идет непрерывно и соблюдение всех вышеуказанных требований не представляет трудностей [11].

Важнейшим здесь является организация такого теплового процесса в установке с ГК, который бы обеспечил в переходных режимах требуемый по технологии для данной марки алюминиевого сплава диапазон температур в

контрольных сечениях до и после зоны прессования. При этом правильный выбор режима затвердевания слитка существенно влияет на формирование его структуры и свойств [36]. Величина указанного промежутка времени зависит от таких факторов, как начальная температура расплава, удаленность матрицы от места заливки, скорость движения канавки с металлом, интенсивность его охлаждения, размеры поперечного сечения и др. [37, 134–137]. Сложный характер взаимодействия между этими факторами изучен недостаточно, что затрудняет модернизацию действующих и проектирование новых установок совмещенного процесса литья и прессования.

### **1.3 Методы теплового расчета и моделирования процессов непрерывного литья и прессования металлов**

Теоретическим и экспериментальным исследованиям тепловой работы установок непрерывного литья и деформации посвящены работы многих исследователей: Горохова Ю.В., Беляева С.В., Колягина Ю.А., Тимошпольского В.И., Самойловича Ю.А., Лисиенко В.Г., Лукина С.В., Лебедева В.И., Лехова О.С., Лукина С. В., Минакова В.С., Шестакова Н.И., Бровмана М.Я., Темлянцева М.В., Жиганова Н.К., Космацкий Я.И., Першина Д.С., Гинкина В.П., Черномас В.В., Сулимцева И.И., Zhou T.G., Krol M., S. Mondol, Popescu I.N., Mitka M., Tekkaya A. E., D. Robinson, R. Palaninathan, F. Chabchoub, Flemings M. C. и других [2, 4, 10, 12, 29, 40–51, 110–124].

При затвердевании расплава тепловые процессы в кристаллизаторе зависят в основном от скорости вытягивания слитка, температуры поступающего расплава, расхода и нагрева охлаждающей воды и ее распределения по каналам системы охлаждения. Условия теплосъема в кристаллизаторе также определяются его конструктивными параметрами и технологическими приемами эксплуатации. Закономерности влияния перечисленных выше факторов на теплообмен слитка с кристаллизатором при их изменении изучены недостаточно, поэтому практически не

используются для совершенствования теплосъема в кристаллизаторе [7, 10, 36].

Тепловые условия процесса прессования, как начальные температуры нагрева заготовки и инструмента, выходная температура профиля являются одними из основных факторов, от которых зависят максимальная производительность и уровень качества профилей. Поэтому исследование тепловых условий при прессовании является актуальной задачей, обеспечивающей выбор рациональных режимов технологии производства профилей [46]. Важным является вопрос, каким методом исследовать влияние описанных выше факторов при кристаллизации и прессовании.

В работе [47] представлено аналитическое решение задачи затвердевания расплава в кристаллизаторе горизонтальной установки непрерывной разливки. Решение уравнения, полученное в безразмерных величинах, включающее поля температуры и уравнение для определения границы раздела фаз, может быть получено с помощью математического пакета MathCAD для конкретного набора исходных данных.

При современном уровне развития численных методов и вычислительной техники, можно составить математическую модель и провести её численное исследование практически для любого процесса. К преимуществам численного решения можно отнести низкую стоимость, скорость исследования, полноту полученной информации, возможность моделирования реальных условий. К недостаткам - ошибки при формировании математической модели, в результате чего при численном решении задачи получается неверное решение.

Численные методы решения условно можно разбить на две группы, выделяя прямые и итерационные методы. Прямые методы позволяют за конечное число действий получить точное решение системы уравнений, если входная информация заданы точно и вычисления ведутся без округления. Простейший пример прямого метода - метод прогонки. Итерационный метод позволяет найти приближенное решение системы путём построения

последовательности приближений (итераций), начиная с некоторого начального. Само приближенное решение является результатом вычислений, полученных после конечного числа итераций.

К прямым методам можно отнести методы Гаусса и квадратного корня, к итерационным – Гаусса-Зейделя, верхней релаксации, попеременно-треугольный, вариационно-итерационные, Ньютона, взвешенных невязок, контрольных объемов и ряд др. Применение численных методов при расчете теплообмена и гидродинамики детально рассмотрено в [52].

При исследовании теплообменных процессов в металлургии, традиционная постановка задачи о затвердевании расплава выглядит следующим образом [53]. Имеется массив расплава толщиной  $l$ . Одна часть массива ( $0 \leq x \leq \varepsilon$ ) занята новой фазой (твердая корка), другая часть ( $\varepsilon \leq x \leq l$ ) образована исходной фазой (расплав).

Решением задачи теплопроводности (задачи Стефана) данной системы полагаются функции  $T_1(x,t)$ ,  $T_2(x,t)$  и  $\varepsilon$ , удовлетворяющие уравнениям:

$$\partial T_1 / \partial t = a_1 (\partial^2 T_1 / \partial x^2) \text{ при } 0 \leq x \leq \varepsilon, \quad (1.1)$$

$$\partial T_2 / \partial t = a_2 (\partial^2 T_2 / \partial x^2) \text{ при } \varepsilon \leq x \leq l, \quad (1.2)$$

$$\left( \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \right)_{x=0} = -q_1(t), \left( \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \right)_{x=l} = -q_2(t), \quad (1.3)$$

$$T(x,0) = \varphi(x) \text{ при } 0 \leq x \leq l, t = 0, \quad (1.4)$$

$$T_1(\varepsilon,t) = T_2(\varepsilon,t) = T_{кр}, \quad (1.5)$$

$$\rho L \frac{d\varepsilon}{dt} = \left( \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \right)_{x=\varepsilon}, \quad (1.6)$$

Здесь индекс 1 относит переменные к твёрдой корке, индекс 2 – к расплаву.

Движущей силой процесса является отвод тепла от поверхности  $x = 0$ , где величина плотности потока тепла  $q_1(t)$  считается известной. На поверхности раздела твёрдой и жидкой фаз сохраняется равновесная температура кристаллизации, т.е.  $T_{кр} = \text{const}$ , причём величина переохлаждения расплава полагается пренебрежимо малой.

Зная граничные условия при  $x = 0$  и  $x = l$ , а также начальную температуру расплава, следует найти температурные поля в старой и новой фазах, а также закон изменения размеров области, занятой новой фазой. Постановка задачи Стефана включает условие гладкой, без местных выступов границы раздела фаз, где поддерживается равновесная температура кристаллизации. Между тем прямые наблюдения кристаллизации металлических сплавов указывают на существование двухфазной зоны в затвердевающей слитке.

При неравномерном распределении температуры по сечению слитка наличие интервала температур кристаллизации неизбежно ведёт к образованию двухфазной зоны, ограниченной изотермами начала и конца процесса кристаллизации ( $T_n, T_k$ ). В общем случае в сечении слитка в ходе затвердевания можно выделить три зоны: зону перегретого жидкого расплава, двухфазную зону и зону полностью затвердевшего сплава. Наличие двухфазной зоны ведёт к тому, что теплота фазового превращения  $L$  выделяется в объеме двухфазной зоны, перемещающейся в сечении слитка в ходе затвердевания. Чем шире интервал кристаллизации, тем более рассеяно в пространстве выделение теплоты фазового перехода. В связи с этим при изучении затвердевания слитков, кристаллизующихся в интервале температур, учет выделения тепла кристаллизации естественно осуществить, вводя функцию источника тепла в дифференциальное уравнение теплопроводности для элемента двухфазной зоны:

$$\rho c_m \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + \rho L \frac{\partial \psi}{\partial t}, \quad (1.7)$$

где  $\psi = V_{\text{ТВ}}/V_0$  – относительное количество твердой фазы в пределах двухфазной зоны:

$$\psi = \begin{cases} \psi(T) & \text{при } x_{\text{н}} \leq x \leq x_{\text{к}}, \\ 0 & \text{при } x \leq x_{\text{н}}. \end{cases} \quad (1.8)$$

Интегрируя уравнение (1.7) при соответствующих краевых условиях, находится решение задачи в виде распределения температуры в слитке и координат двухфазной зоны ( $x_{\text{н}}$ ,  $x_{\text{к}}$ ) в различные моменты времени от начала процесса.

В зависимости от того, каким образом определяется количество твёрдой фазы в уравнении (1.7), задача теплопроводности для затвердевающего слитка может быть неравновесной или квазиравновесной. Наиболее распространена модель квазиравновесной кристаллизации сплава, при которой теплота фазового перехода выделяется внутри интервала кристаллизации, ограниченного значениями температуры ликвидуса и солидуса сплава. Соответственно уравнение теплопроводности (1.7) примет следующий вид:

$$\rho c_{\text{эф}}(T) \partial T / \partial t = \text{div}(\lambda \text{grad} T), \quad (1.9)$$

$$c_{\text{эф}}(T) = \begin{cases} c_{\text{ж}} & \text{при } T > T_{\text{liq}}; \\ c_{\text{м}} - L \frac{d\psi}{dT} & \text{при } T_{\text{sol}} \leq T \leq T_{\text{liq}} \\ c_{\text{т}} & \text{при } T < T_{\text{sol}}. \end{cases} \quad (1.10)$$

Стефановская модель, квазиравновесная модель затвердевания расплава основаны на том, что величиной переохлаждения расплава в пределах двухфазной зоны можно пренебречь. Это позволяет получить простое математическое описание условий на фронте кристаллизации слитка в форме нелинейного уравнения теплопроводности с соответствующими

краевыми условиями. Интегрирование полученной системы уравнений приводит к определению поля температур в слитке и закону перемещения фронта кристаллизации.

В работе Ю. А. Самойловича приводится анализ численного исследования затвердевания слитка, получаемого методом непрерывного литья на установке МНЛЗ при использовании квазиравновесной теории двухфазной зоны. Рассматриваются закономерности формирования слитка при разливке стали [53].

В работе [54] авторами описана математическая модель процесса затвердевания расплава в МНЛЗ и ее численное решение при использовании программного модуля CCAST представленное на (рис.1.11).

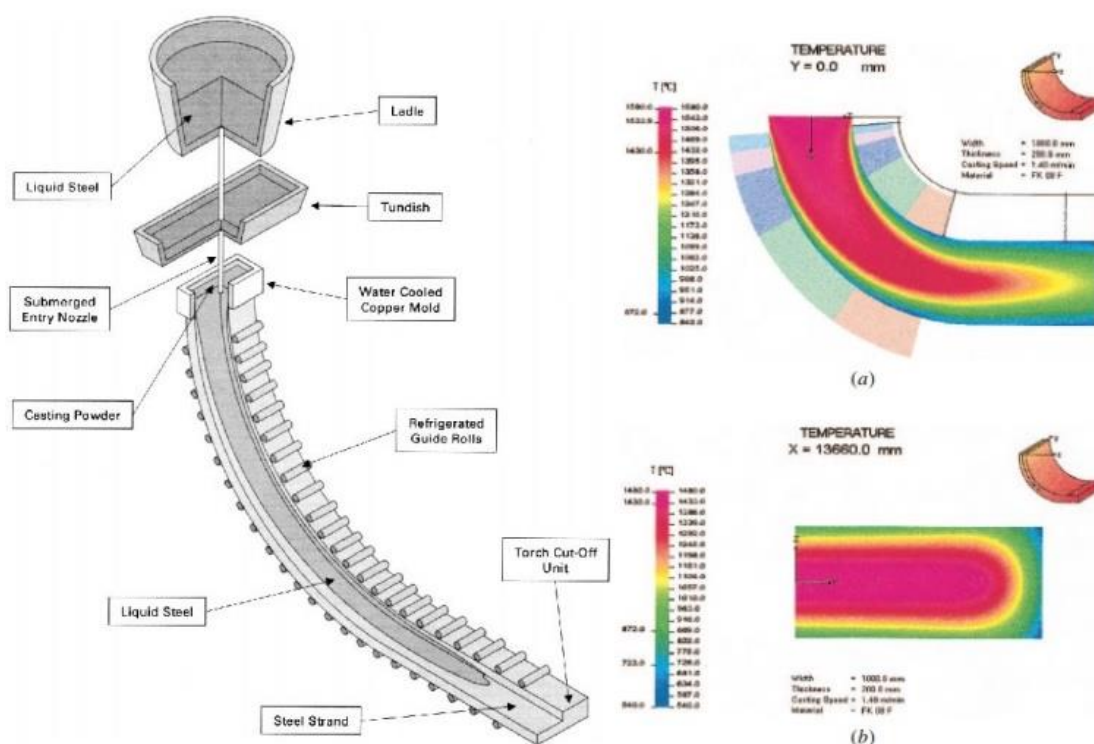


Рис. 1.11. Общий вид МНЛЗ и результаты численного исследования:  
*a* – распределение температуры по сечению затвердевшей части слитка;  
*b* – распределение температуры по сечению затвердевающего расплава  
 в зоне охлаждения [54]

В работе [7] представлена математическая модель теплообмена при разливке стали в МНЛЗ с учетом квазиравновесной модели затвердевания

расплава. Уравнение энергии, описывающее температурное поле подвижной или неподвижной среды, при стационарных или нестационарных условиях разливки, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_m(T_m) \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_m(T_m) \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_m(T_m) \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) = \\ & = c_{эф}(T_m) \cdot \rho_m(T_m) \cdot \left( \frac{\partial T_m}{\partial \tau} + \omega_x \cdot \frac{\partial T_m}{\partial x} + \omega_y \cdot \frac{\partial T_m}{\partial y} + \omega_z \cdot \frac{\partial T_m}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (1.11)$$

где,  $T_m$  – температурное поле затвердевающего расплава;  $\lambda_m(T_m)$  – зависимость молекулярного коэффициента теплопроводности от температуры;  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – проекции скорости перемещения на оси  $x, y, z$ ;  $c_{эф}$  – коэффициент эффективной теплоемкости.

В работе [55] автор отмечает, что при затвердевании сплава в каждой ячейке температура и концентрация твердой фазы на поверхности ячейки постоянна. Однако внутри ячейки без изменения температуры, концентрация твердой фазы изменяется из-за различия коэффициента температуропроводности компонентов сплава [56].

В статьях [57 - 62] рассматривается принципиальная схема установки горизонтального литья и деформации металла (УГЛДМ) [63] для реализации совмещенного процесса производства металлоизделий из цветных сплавов. Проведен анализ теплового режима работы кристаллизатора УГЛДМ и определены критерии устойчивости процесса получения полосы из технического алюминия. Описаны уравнения регрессии описывающие процесс продолжительности прогрева кристаллизатора. Данные уравнения позволяют определить такое сочетание основных технологических параметров процесса, при которых можно обеспечить устойчивость технологического процесса получения металлоизделий на УГЛДМ. Приведены графики распределения температур, по областям кристаллизатора удовлетворяющие температурным критериям устойчивости процесса.



В работе [64] рассмотрена математическая модель для численного моделирования процесса полунепрерывного литья плоских алюминиевых слитков, реализованная в программном пакете ProCAST. В результате расчётного исследования получены температурные поля в сечении слитка в процессе затвердевания расплава (рис. 1.12).

В работе [65] проведён анализ теплового состояния металла в процессе литья на основе программных комплексов ANSYS и ProCAST. Представлены результаты компьютерного моделирования литья платины в водоохлаждаемую изложницу с подвижным дном (рис.1.13).

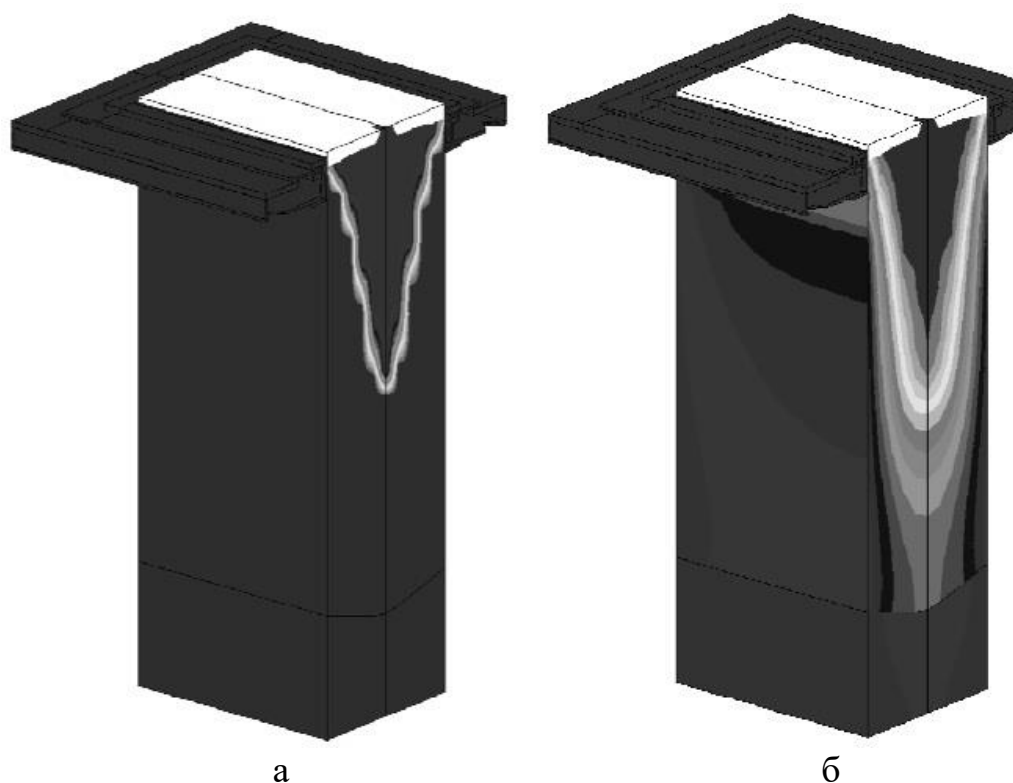
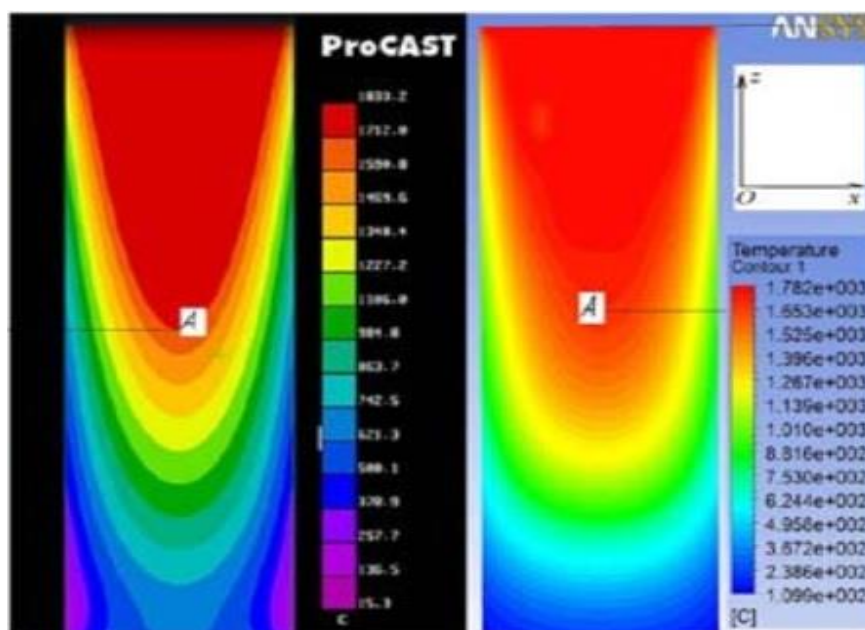


Рис. 1.12. Распределение твердой фазы в слитке (а); и температуры затвердевающего слитка в кристаллизаторе (б) на 1590 с процесса [64]



а

б

Рис. 1.13. Температурное поле в расчетном сечении отливки:  
*а и б* – расчёт в пакетах ProCAST и Ansys соответственно [65]

При оценке авторами степени адекватности результатов тепловых расчетов, полученных в моделях ANSYS и ProCAST, установлено, что характер и численные значения температурных полей в обеих моделях оказались достаточно близки.

В работе [66] рассматривается математическая модель и результаты численных исследований теплообмена при непрерывном литье. В модели уравнения записаны в цилиндрической системе координатах, использовалась шахматная сетка и алгоритм для расчета поля течения SIMPLER.

Авторами [67] предложена модель неравновесной кристаллизации для численного решения задачи выращивания полупроводниковых кристаллов основанная на решении нестационарной задачи Стефана с учетом действия механизма концентрационного переохлаждения расплава, а также дискретности перемещения температурного профиля.

В работе [68–70] разработана математическая модель процесса кристаллизации для двухкомпонентных расплавов на примере сплава Sn+20%Pb. Численно решается задача Стефана с двумя границами: твердая фаза – двухфазная переходная зона и двухфазная зона – жидкая фаза.

Двухфазная зона представлена пористой средой с переменной пористостью. Впервые для двухфазной зоны вводится квадратичная зависимость пористости от температуры. Полученная система уравнений решается неявным методом установления с использованием экспоненциального метода аппроксимации, метода Патанкара-Сполдинга и метода неполной факторизации. Данная модель реализована в программе GIGAN при вертикальной направленной кристаллизации.

В работе [71] рассматривается компьютерная модель кристаллизации алюминиевого расплава при моделировании процесса бесслитковой прокатки, с учётом диффузии легирующих элементов.

В работах [110-112] описаны численные модели задачи Стефана с использованием точного решения. Представлены результаты исследования влияния настроечных параметров численного алгоритма на погрешность моделирования.

Также в разработке математических моделей и численному исследованию процесса литья и затвердевания расплава посвящены работы зарубежных учёных [113-127] и многие др.

В работе [72] разработан подход к математическому моделированию процесса прессования предварительно нагретых алюминиевых цилиндрических заготовок. Реализация численной модели процесса прессования в данной работе производится на базе программного пакета Ansys LS-Dyna, позволяющий находить решение совместно механической и тепловой задачи.

В работе [10] описана методика создания компьютерной модели процесса полунепрерывного прессования длинномерных профилей из алюминиевых сплавов. Представлены результаты компьютерного моделирования процесса полунепрерывного прессования сплава АД31 в программном комплексе Deform-3D.

В работе [73] авторы рассматривают напряженно-деформированное состояния биметалла при прессовании через ступенчатую матрицу сложной

формы. Для компьютерного моделирования авторами был выбран пакет ABAQUS/CAE. Описанная в [73] модель учитывает деформационное и скоростное упрочнение и термическое разупрочнение, а также имеет возможность задавать модель пластического разрушения с вычислением параметра поврежденности.

В работе [74] авторами представлена математическая модель и проведено расчетное исследование закономерностей формирования температурного режима при радиальном СВС-прессовании цилиндрических заготовок с неоднородным теплоизолятором. Отмечено, что для реального технологического цикла тепловой режим при радиальном СВС-прессовании можно считать квазистационарным с квазиоднородным температурным полем в заготовке и песчаной оболочке.

В работе [75] разработана математическая модель для технологических задач прессования цветных металлов с использованием относительных параметров и комплексных критериев. Многопараметрическая модель позволяет определить силовые, скоростные, температурные параметры процесса и их изменение во времени.

Разработке математических моделей и численному исследованию процесса прессования посвящено множество работ отечественных учёных [76-82] и зарубежных коллег [126-128] и ряд др.

Авторами работ [83-88] приведены математические модели и результаты численных исследований совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для различных установок.

Численные исследования процесса непрерывного литья и прессования цветных металлов в инновационной установке с ГК рассматриваются в работах [43-46]. Залитый в канавку колеса расплав металла кристаллизуется по мере его вращения и достигает при определенной температуре зоны деформации, в процессе которой температура заготовки изменяется. Величина этого изменения зависит от количества работы, затрачиваемой на преодоление контактного трения, осуществление деформации металла,

которая практически вся превращается в тепло [43]. При увеличении коэффициента вытяжки повышается площадь контакта заготовки с неподвижным инструментом и работа на осуществление деформации, что вызывает рост температуры прессования [44].

Для моделирования процесса кристаллизации в горизонтальном кристаллизаторе авторами применен программный комплекс ProCast, в свою очередь модель процесса прессования по методу Конформ реализована в пакете инженерного анализа Deform-3D. Соответственно численное исследование проводилось в два этапа. На первом этапе моделировали процесс литья в карусельный кристаллизатор. Получали распределение температуры в затвердевшем металле перед попаданием под дугообразный сегмент. Полученные результаты моделирования использовались как исходные данные второго этапа численного исследования - моделирования процесса прессования по методу Конформ [46].

В работах [11, 82] рассмотрен анализ теплового взаимодействия при прессовании, который сводится к оценке на основе уравнения теплового баланса системы металл - инструмент - окружающая среда в очаге деформации [4]. Использование данной методики расчета для выбора температурно-скоростных режимов непрерывного прессования металлов с учетом сопротивления деформации от температуры, степени и скорости позволит в первом приближении установить рациональный режим и выбрать пути по его совершенствованию.

Аналитическое решение задачи нестационарной теплопроводности процесса прессования рассмотрено в работе [46] где определены зависимости количества выделенного тепла от трения и в процессе деформации обрабатываемого металла под дугообразным сегментом установки непрерывного литья и прессования.

Для постановки задачи теплопроводности рассматриваются условия теплообмена при прессовании способом Конформ. Заготовка, нагретая до известной температуры, перемещается под действием активных сил трения

относительно дугообразного сегмента, с постоянной скоростью с последующим выдавливанием в профиль через рабочее отверстие в матрице. С наружной поверхности инструмент охлаждается тепловым потоком интенсивностью  $q_0$ .

Заготовка разбивается на две характерные зоны, отличающиеся различной термодинамикой: это очаг деформации и зона активного трения. При этом на границах контакта заготовки и прижимной части башмака, наружной поверхности очага деформации и канавки карусельного кристаллизатора постоянно действует источник тепла от внешних сил трения плотностью  $q_r$  [89].

Условия поставленной задачи в математической форме представлены в виде системы двух дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности:

$$\begin{cases} a_1 \frac{\partial^2 T_1(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\partial T_1(x,t)}{\partial t} + \frac{q_v}{c_1 \rho_1} = 0, \text{ при } 0 \leq x < +\infty, \\ a_2 \frac{\partial^2 T_2(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\partial T_2(x,t)}{\partial t} = 0, \text{ при } -\infty < x \leq 0, \quad t > 0, \end{cases} \quad (1.12)$$

где  $a_n, \lambda_n, c_n, \rho_n$  – соответственно коэффициенты температуропроводности, теплопроводности, теплоемкости и плотность  $n$ -ого тела; индекс 1 определяет параметры деформируемого металла, индекс 2 – прессового инструмента. Решение поставленной задачи производится с применением стандартных методик, которые представлены в [90].

В результате решения задачи получены аналитические зависимости распределения температур при прессовании профилей в критериальной форме [46].

Полученные решения позволяют, сокращая число переменных, более четко выявить внутренние связи, характеризующие процесс теплового взаимодействия между деформируемым металлом и принудительно

охлаждаемым контейнером во время прессования. Введенные в них переменные по своему существу являются обобщенными, что обеспечивает рациональное решение задач для множества различных комбинаций параметров, входящих в данные переменные.

На основании выше изложенного приходим к выводу, что в аналитическом виде можно получить решение только небольшой части задач, имеющих практический интерес. Эти решения часто содержат бесконечные ряды, специальные функции и их числовая оценка может представлять собой сложную задачу.

На сегодняшний день, для решения разнообразных задач, существует множество программ, реализующих численное решение задачи на основе математического моделирования, называемые системами автоматизации инженерных расчетов или CAE системами. Их можно разделить на две группы: узконаправленные и универсальные CAE системы. Узконаправленные CAE системы, как правило, разрабатываются для конкретных устройств.

В работе [73] отмечено, что для анализа напряженно-деформированного состояния численные методы находят широкое применение в программных системах: Ansys, Abaqus, QForm-3D, Super Forge, Deform-3D и др.

Моделирование процессов обработки металлов давлением позволяет проводить всесторонние исследования, так как позволяет изменять базовые параметры модели в широком диапазоне. Авторы [91] отмечают, что программный комплекс Ansys является универсальным средством для проведения численных исследований методом конечных элементов, позволяющий учесть в одной модели многие физические и технологические процессы. К тому же на сегодняшний день многие программы интегрированы в программный пакет ANSYS Workbench.

При моделировании процессов заполнения расплавом формы и последующей кристаллизации сплава с помощью различных программных

пакетов, одним из лучших решений, существующих сейчас на российском рынке, является пакет программных продуктов фирмы «ESI Group» (Франция, Швейцария) — ProCast и QuikCast.

ESI Group разработала комплекс программных продуктов для моделирования литейных процессов, позволяющих улучшить их продуктивность и качество: QuikCAST – быстрое и эффективное решение для анализа будущего литейного процесса, и ProCAST – продвинутое решение, разработанное и отточенное в течение 20 лет на реальных производственных процессах при поддержке партнеров ESI в сфере производства литейной продукции. QuikCAST сфокусирован на основных процессах – заполнение, отверждение и анализ пористостей. ProCAST – программный продукт, основанный на конечно-элементном методе, анализирует и предсказывает также деформации, остаточные напряжения, работает и с более специфическими процессами, такими как пластичное моделирование, изготовление на пескодувной машине, центробежное литье, литье по газифицируемым моделям, непрерывное литье [92].

Из множества универсальных CAE систем, наиболее популярными, для решения задач кристаллизации, прессования, тепловых и гидродинамических задач, являются, FLUX, COMSOL, Open FOAM, ANSYS, CFX, Fluent.

Лидером среди программ для проведения численного исследования физических процессов является ANSYS Incorporated. Одной из наиболее известных программ данной корпорации является ANSYS, которая базируется на конечно элементных решениях линейных и нелинейных, стационарных и переходных пространственных задач механики деформируемого твердого тела и механики конструкций, задачи механики жидкостей и газов, теплопередачи и теплообмена, электродинамики и акустики и включает в себя все стадии математического моделирования. Одним из ее основных достоинств является наличие специально разработанного для нее встроенного языка сценариев ANSYS Parametric



Design Language (APDL). Данный язык позволяет полностью автоматизировать создание и анализ параметрических моделей.

ANSYS CFX и Ansys FLUENT – это основные продукты для задач гидрогазодинамики общего назначения, предлагаемые компанией ANSYS, Inc. Оба модуля основаны на методе контрольных объемов, дающем высокую точность, и используют решатель по давлению, что позволяет применять эти продукты для решения широкого круга инженерных задач. Основные отличия состоят в способе интегрирования уравнений течения жидкостей и в стратегиях решения уравнений.

Наиболее популярна на сегодняшний день программа Fluent, входящая в программный пакет ANSYS Workbench. Данная программа использует сетку конечных объемов (числовые значения в центрах ячеек), и позволяет проводить анализ широкого спектра задач динамики жидкости и газа многофазных потоков, с учетом теплообмена, теплопроводностью, конвекцией и излучением. Но основной ее отличительной особенностью от других программ является наличие специализированного модуля решения задач кристаллизации и плавления, учитывающего все необходимые факторы для корректного решения задач литья металлов и сплавов.

Одной из программ для решения задач тепломассообмена и гидродинамики является программа CFX. Также входящая в программный пакет ANSYS Workbench, CFX обладает многочисленными физическими моделями, охватывающими большинство типов явлений, связанных с течением жидкости. При этом он имеет возможность внедрения пользовательских функций, за счет наличия встроенного языка CFX Expression Language (CEL). Модуль ANSYS CFX Solver является передовой алгебраический многосеточный сопряженный решатель, использующий технологию Coupled Algebraic Multigrid, являющуюся ключом к получению точных результатов. Используется схема дискретизации второго порядка, обеспечивая получение максимально точных результатов. Решатель ANSYS CFX использует сетку конечных элементов (числовые значения в узлах

сетки). Особый упор сделан на решение основных уравнений движения (сопряженная алгебраическая сетка) [93].

#### **1.4 Выводы и постановка задачи исследования**

1. Проведённый анализ существующего оборудования для реализации процесса непрерывного совмещенного литья и прессования цветных металлов показал, что обеспечение надежной и длительной эксплуатации установок в существенной мере зависит от рационального выбора режимов их работы: температуры заливки металла, кристаллизатора и прессового инструмента; скорости затвердевания металла и прессования. Поэтому практический интерес вызывает знание влияния режимных параметров на характер температурного поля металла в процессе его движения от места заливки в инструмент до выхода из зоны деформации.

2. Для исследуемой установки НСЛиП с ГК технологический процесс должен отвечать следующим требованиям: расплавленный металл не затвердевает в начальной фазе процесса; скорость перемещения расплавленного металла постоянна и соответствует скорости его затвердевания, определяемой интенсивности теплоотвода от прессового инструмента; в потоке расплавленного металла исключена турбулентность. При этом обрабатываемый металл должен попадать под дугообразный сегмент с температурой в своём сечении ниже «солидуса», в противном случае происходит налипание жидкого металла на сегмент с матрицей и как следствие выход из строя установки.

3. При нестационарном режиме работы установки НСЛиП с ГК температура по сечению металла меняет свое положение по длине дуги кристаллизатора с каждым его оборотом. Связано это с тем, что в переходном режиме происходит постепенный прогрев карусельного кристаллизатора, матрицы и других элементов (включая подшипники кристаллизатора, имеющую вполне определенную допустимую температуру

эксплуатации) в результате тепловыделения в процессе затвердевания и прессования.

4. Установлено, что с целью совершенствования конструкции и тепловых процессов в установке непрерывного совмещенного литья и прессования алюминиевых сплавов с горизонтальным кристаллизатором требуются дальнейшие экспериментальные и расчетно-теоретические исследования нестационарного теплообмена.

5. Показано, что наиболее целесообразно проводить анализ теплового состояния всей конструкции установки НСЛиП с ГК с использованием численной модели, построенной на базе программного пакета ANSYS CFX и позволяющей учесть при моделировании теплообмен между элементами установки и обрабатываемым сплавом, движение горизонтального кристаллизатора, выделение теплоты при фазовом переходе и прессовании.

В диссертационной работе необходимо решить следующие задачи:

1. Провести экспериментальное исследование особенностей переходных тепловых процессов в опытно-промышленном образце установки НСЛиП с ГК при обработке алюминиевого сплава.

2. Разработать компьютерную модель процесса нестационарного теплообмена в опытно-промышленном образце установки НСЛиП с ГК.

3. Провести численный анализ теплообмена в переходных режимах работы установки НСЛиП с ГК при обработке алюминиевых деформируемых сплавов.

4. Разработать рекомендации по совершенствованию теплового процесса в установке НСЛиП с ГК, обеспечивающего в переходных режимах требуемый по технологии для данной марки алюминиевого сплава диапазон температур в контрольных сечениях до и после зоны прессования.

## **ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ УСТАНОВКЕ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ КРИСТАЛЛИЗАТОРОМ**

Совмещение процессов непрерывного литья и прессования (НЛиП) металла в единую технологическую цепочку возможно только при таких тепловых условиях в системе металл-инструмент-окружающая среда, которые обеспечивают затвердевание расплава в канавке колеса-кристаллизатора и прессование затвердевшего слитка силами контактного трения при заданной температуре.

Температурно-скоростной режим работы установки имеет решающее значение для создания оптимальных условий процесса литья-прессования. С одной стороны, высокая температура прессования может привести к снижению качества пресс-изделий вплоть до появления брака. С другой – слишком низкая температура ведет к повышению сопротивления деформации. Поэтому при выборе температурно-скоростного режима необходимо избегать обоих указанных граничных случаев [10].

Одним из основных параметров этого процесса является промежуток времени между заливкой в инструмент расплава и входом затвердевшего металла под прессовый инструмент (дугообразный сегмент) с матрицей. А также определение промежутка времени, по достижении которого необходимо принудительно охлаждать дугообразный сегмент [36]. В свою очередь, величина этого промежутка времени зависит от таких факторов, как температура расплава, удаленность матрицы от места заливки, скорость движения канавки с металлом, интенсивность его охлаждения, размеры поперечного сечения и т. д. Кроме этого, режимы кристаллизации и остывания слитка оказывают существенное влияние на формирование его структуры и свойств [135-137]. Сложный характер взаимодействия между этими факторами до сих пор изучен недостаточно, что затрудняет проектирование устройств совмещенного процесса литья и прессования.

## 2.1. Конструкция и принцип работы установки

Способ прессования Conform-Castex, при котором жидкий металл заливается в установку, является самым экономичным способом получения стандартной проволоки или профилей из всех других способов изготовления аналогичных изделий из твердого металла путем деформации [25]. Однако технических данных об этой установке, практических результатов эксплуатации в технической литературе не приводится. Это связано, по-видимому, с нежеланием авторов раскрывать путь преодоления определенных трудностей в осуществлении и поддержании стабильного, устойчивого процесса непрерывной кристаллизации жидкого металла и его прессования, во многом зависящего от эффективной работы системы непрерывной подачи расплавленного металла в канавку рабочего колеса. Она должна отвечать следующим требованиям:

- расплавленный металл не затвердевает в начальной фазе процесса;
- скорость перемещения расплавленного металла постоянна и соответствует скорости его затвердевания, определяемой интенсивности теплоотвода от прессового инструмента;
- в потоке расплавленного металла должна быть исключена турбулентность.

Использование базовой установки Conform для непрерывной заливки в канавку рабочего колеса жидкого металла, его затвердевание и прессование вызывает затруднения в соблюдении этих требований, в частности, в стабилизации подачи металла в инструмент, вследствие «намораживания» жидкой фазы расплава при затвердевании на входную часть неподвижной кольцевой вставки. Устранение этого недостатка возможно при совмещении непрерывного прессования с непрерывным литьем металла на установке Conform с вертикальной осью вращения колеса-кристаллизатора карусельного типа [26, 28]. На рис. 2.1 приведена схема установки совмещённого НЛиП с карусельным горизонтальным кристаллизатором (ГК).

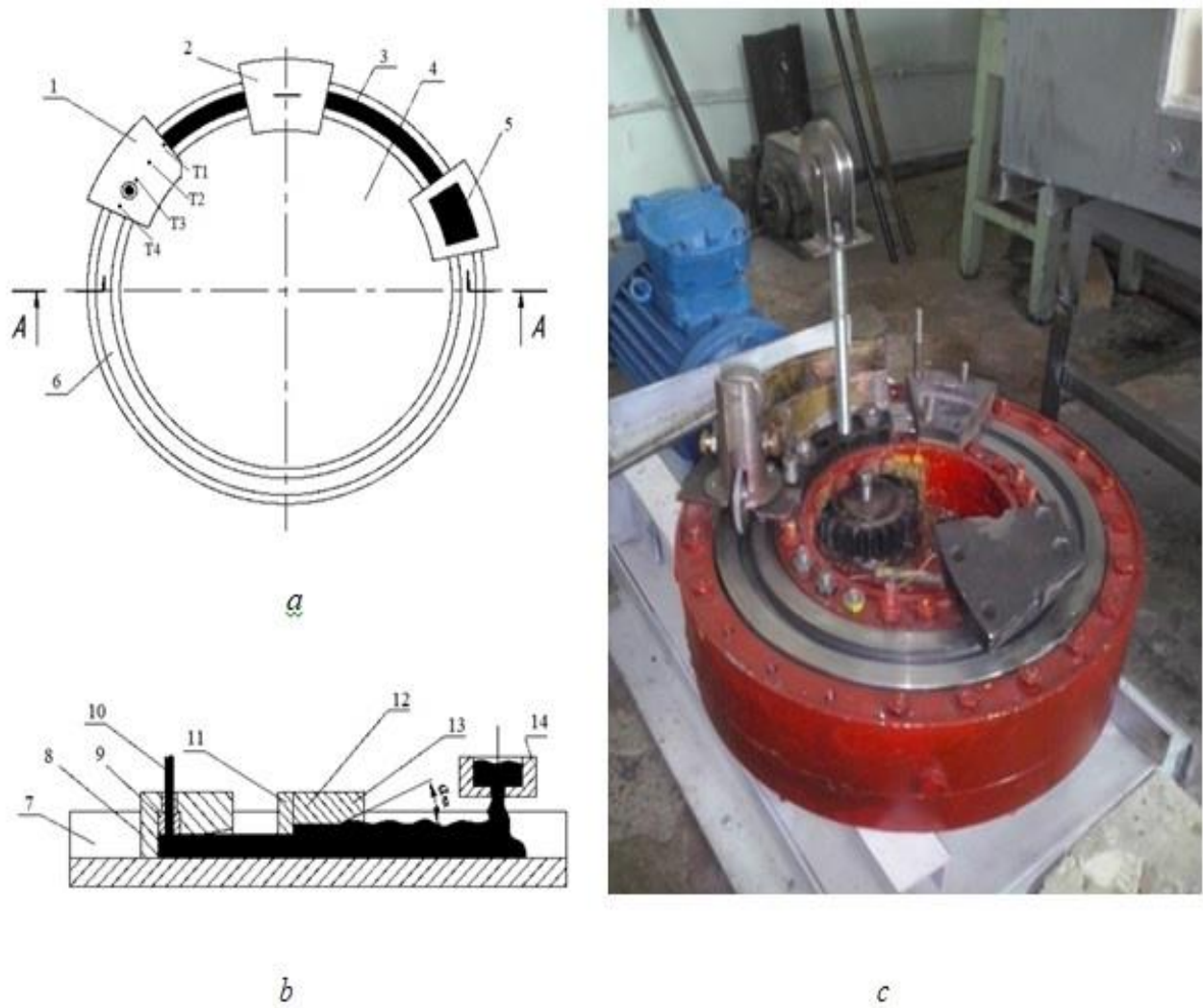


Рис. 2.1. Схема установки совмещённого непрерывного литья и прессования с горизонтальным кристаллизатором [95]:

- а – вид сверху: 1 – основной неподвижный дугообразный сегмент; 2 – промежуточная неподвижная сегментная вставка; 3 – зона кристаллизации металла; 4 – кристаллизатор; 5 – дозатор; 6 – кольцевая канавка; T1, T2, T3, T4 – датчики температуры в теле дугообразного сегмента;
- б – вид сбоку: 7 – кольцевая канавка; 8 – выступ; 9 – матрица; 10 – пресс-изделие; 11 – выступ; 12, 13 – участки промежуточной неподвижной сегментной вставки; 14 – дозатор;
- с – общий вид установки

В процессе работы установки приводится во вращение кристаллизатор 2, выполненный в виде горизонтального колеса. Реализация процесса происходит в следующей последовательности: расплавленный металл через дозатор 1 заливается в кольцевую канавку 3, выполненную на верхней части колеса кристаллизатора 2. При этом скорость заливки расплавленного

металла в кольцевую канавку 3 находится в строгом соответствии с частотой вращения кристаллизатора 2. За время движения до промежуточной неподвижной сегментной вставки 8 расплавленный металл охлаждается, затвердевает и принимает форму поперечного сечения канавки 3. В промежуточной неподвижной сегментной вставке 8 на поверхности затвердевшего металла прорабатывается его наружный слой с литейными дефектами и увеличивается интенсивность контакта металла со стенками кольцевой канавки 3. Далее затвердевший металл в кольцевой канавке 3 по ходу вращения кристаллизатора 2 достигает выступа 6 под неподвижным дугообразным сегментом 4, где под действием сил контактного трения между стенками кольцевой канавки 3 и затвердевшим металлом происходит выдавливание через рабочий канал матрицы 5 пресс-изделия 12.

Датчики температуры расположены в теле дугообразного сегмента на углублении 1,5 см по центру оси симметрии. Датчик температуры  $T1$  соответствует началу дугообразного сегмента,  $T2$  – повороту на  $20^\circ$  вокруг оси симметрии установки от начала дугообразного сегмента,  $T3$  (рядом с матрицей) –  $40^\circ$ ,  $T4$  –  $65^\circ$  соответственно (см. рис. 2.1а.). Поперечное сечение ручья колеса-кристаллизатора прямоугольное с радиусом  $1 \div 2$  мм в местах сопряжения дна со стенками. Выступ дугообразного сегмента с матрицей сопрягается с ручьем, входя в него на глубину 4 мм, образуя тем самым калибр сечением 10x10 мм. Дугообразный сегмент и кристаллизатор изготовлены из стали 5ХНМ, заливная воронка – из шамота. Размер отверстия для подачи расплава в канавку кристаллизатора рассчитан согласно закону постоянства секундных объемов, и составляет 1,8 мм.

Для повышения производительности процесса НЛиП и качества пресс-изделий из цветных металлов и сплавов предложена установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла [94], представленная на рис. 2.2.

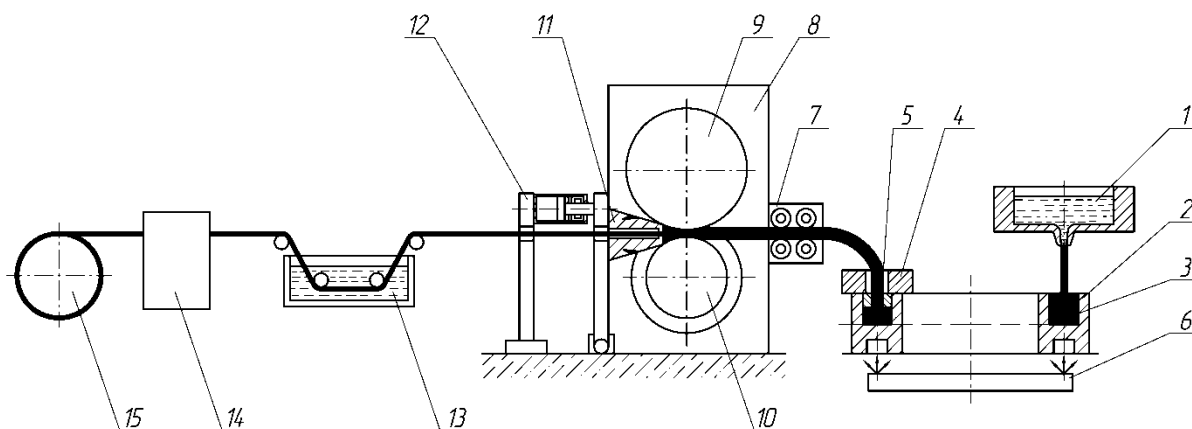


Рис. 2.2 - Схема установки для непрерывного литья, прокатки и прессования металла [94]:

1 – печь-миксер с питателем; 2 – колесо-кристаллизатор; 3 – кольцевая канавка; 4 – неподвижная секторная вставка; 5 – вертикальная матрица; 6 – устройство для охлаждения кристаллизатора; 7 – правильно-задающее устройство; 8 – деформирующий узел; 9 – валок с выступом; 10 – валок с ручьем; 11 – горизонтальная матрица; 12 – гидроцилиндр; 13 – охлаждающее устройство пресс-изделия; 14 – универсальная прокатная клеть; 15 – устройство для намотки изделий

Во время работы установки приводится во вращение кристаллизатор 2, выполненный в виде диска, и включается устройство 6 для его охлаждения. Расплавленный металл из печи-миксера с питателем 1 заливается в кольцевую канавку 3, выполненную на верхней части диска кристаллизатора 2. За время движения до неподвижной секторной вставки 4 расплавленный металл охлаждается, затвердевает и принимает форму поперечного сечения канавки 3. Перед входом в рабочий калибр с помощью сменного резцового элемента с поверхности затвердевшего металла удаляется наружный слой с литейными дефектами. Затвердевший металл в кольцевой канавке 3 по ходу вращения диска достигает упора в рабочем калибре. Далее под действием сил контактного трения между стенками кольцевой канавки 3 и затвердевшим металлом происходит его выдавливание через рабочий канал вертикальной матрицы 5. Полученное пресс-изделие с помощью правильно-задающего устройства 7 поступает в закрытый рабочий калибр, образованный валком с выступом 9 и валком с ручьем 10, где деформируемый металл подвергается пластической деформации и



выдавливается в виде пресс-изделия через горизонтальную матрицу 11, поджатую гидроцилиндром 12. Затем пресс-изделие сматывается в бухту на устройстве намотки 15, пройдя перед этим охлаждение в емкости охлаждающего устройства 13 и калибровочную прокатку в универсальной клети 14. Анализ результатов исследований показал, что заготовка, полученная в горизонтальном карусельном кристаллизаторе, имеет более проработанную мелкозернистую структуру и повышенную пластичность, чем литая заготовка, полученная в электромагнитном кристаллизаторе. На поверхности заготовки, изготовленной с помощью предлагаемой установки, отсутствуют литейные дефекты, размеры сечения стабильны по ее длине, а квадратное сечение создает более благоприятные условия при ее деформировании в деформирующем узле, и повышает точность размеров прутка после прессования. На данную установку получен патент РФ №102550 [94].

Для повышения стабильности процесса непрерывного литья - прессования и качества пресс-изделий из цветных металлов и сплавов предложена установка для непрерывного литья, и прессования металла с горизонтальным кристаллизатором [95], представленная на (рис. 2.3, а – г).

Во время работы установки приводится во вращение кристаллизатор 2, выполненный в виде диска. Расплавленный металл из питателя (на чертеже не показан) поступает в печь-миксер с дозатором 1 и далее заливается в кольцевую канавку 3, выполненную на верхней части диска кристаллизатора 2. При этом скорость заливки расплавленного металла в кольцевую канавку 3 для оптимального ее заполнения находится в строгом соответствии с частотой вращения кристаллизатора 2. За время движения до промежуточной неподвижной сегментной вставки 8 расплавленный металл охлаждается, затвердевает и принимает форму поперечного сечения канавки 3. Во время прохождения обрабатываемым металлом через промежуточную неподвижную сегментную вставку 8 с помощью прижимного устройства под действием силы (не показано на чертеже) происходит вдавливание пуансона

10 в обрабатываемый металл на необходимую глубину, при которой обеспечивается полный контакт деформируемого металла со стенками кольцевой канавки 3. Далее обрабатываемый металл в кольцевой канавке 3 по ходу вращения кристаллизатора 2 достигает основного башмака 4, где под действием активных сил контактного трения между стенками кольцевой канавки 3 и обрабатываемым металлом происходит его выдавливание в пресс-изделие 18 через рабочий канал вертикальной матрицы 5.

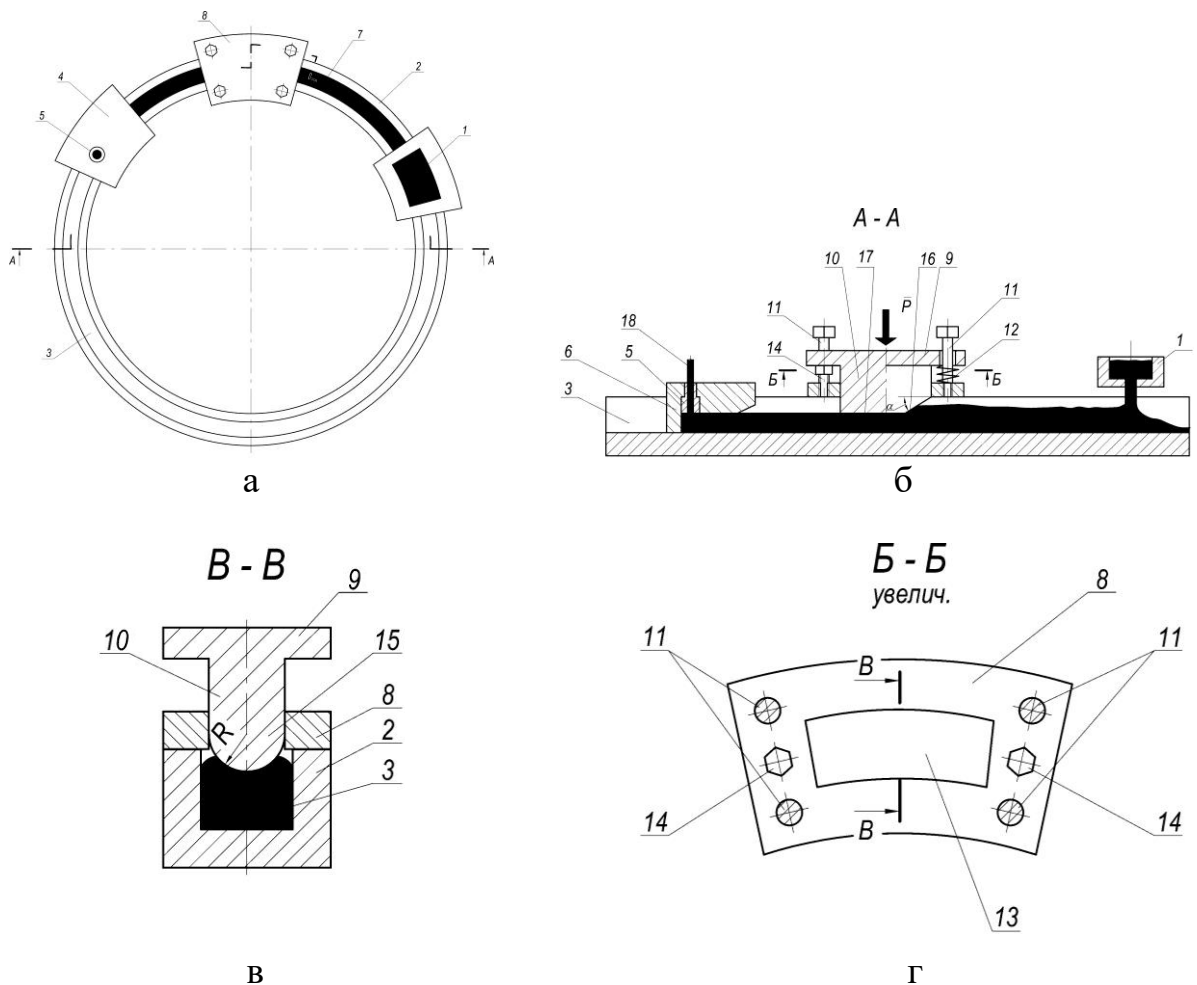


Рис. 2.3 - Схема установки для непрерывного литья и прессования металла с горизонтальным кристаллизатором [95]:

1 – печь-миксер с дозатором; 2 – колесо-кристаллизатор; 3 – кольцевая канавка; 4 – башмак; 5 – матрица; 6 – выступ; 7 – зона кристаллизации металла; 8 – промежуточная неподвижная сегментная вставка; 9 – плита; 10 – пуансон; 11 – направляющие колонки; 12 – пружины; 13 – направляющее отверстие; 14 – регулировочные винты; 15 – выпуклая рабочая поверхность пуансона; 16 – наклонный участок рабочей поверхности пуансона с входным углом; 17 – параллельный дну кольцевой канавки участок рабочей поверхности пуансона

Вдавливание пуансона в обрабатываемый металл на необходимую глубину, при которой обеспечивается полный контакт деформируемого металла со стенками кольцевой канавки, и, как следствие, позволяет достичь максимально возможного значения активных сил трения на стенках кольцевой канавки в башмаке во время выдавливания обрабатываемого металла через рабочий канал матрицы.

Следует отметить, что протяженность вдавливания пуансона в деформируемый металл и глубина вдавливания зависит в основном от реологических свойств деформируемого металла, степени заполнения им кольцевой канавки и регулируется с помощью винтов, вкрученных в промежуточную неподвижную сегментную вставку. Время прижима пуансона зависит от скорости вращения кристаллизатора и должно быть не меньше временного промежутка от начала прижима до момента выхода профиля из канала матрицы. После чего отключается прижимное устройство, и пуансон с помощью пружин, расположенных на направляющих колодках, возвращается в исходное положение. Выпуклая форма пуансона увеличивает площадь контакта деформируемого металла со стенками кольцевой канавки во время выдавливания и увеличивает тем самым активные силы трения во время прессования. Наклонный участок пуансона при последующем поступлении деформируемого металла в башмак улучшает условия захвата. Все это в совокупности повышает стабильность осуществления непрерывного процесса литья и прессования металла методом «Конформ», обеспечивает постоянство размеров и механических свойств получаемых пресс-изделий по длине, т.е. качество продукции. На данную установку получен патент РФ №146555 [95].

## **2.2. Методика экспериментального исследования и используемое оборудование**

В связи с тем, что температура алюминиевого расплава довольно

высока (порядка 750 °С), необходимо использовать средства измерения с соответствующей градуировкой. Для решения поставленной задачи, при исследовании переходного теплового процесса в опытно-промышленном образце установки НСЛиП алюминиевого сплава с ГК были использованы в соответствии с рекомендациями [96, 97] устройства фиксации температуры: хромель-алюмелевые (ХА (К)) термоэлектрические преобразователи (ПТ) в защитном кожухе (рис. 2.4). ХА ПТ имеют практически линейную градуировочную характеристику и диапазон измеряемых температур от -200 до +1300 °С.

На рис. 2.5 представлены высокотемпературный инфракрасный термометр (до +1500 °С) с 4-х точечным лазерным целеуказателем Testo 835-T2 и термометр CENTER-309, имеющий 4 аналоговых входа для подключения термопар К-типа.

Пирометр Testo 835-T2 также имеет дополнительный аналоговый вход подключения зонда термопары К-типа для контактных измерений температуры. Оба прибора имеют встроенную память. Имеют возможность записи измерений с настраиваемым временным интервалом фиксации температуры. Пользуясь программным обеспечением, которое поставляется вместе с приборами, можно обработать измеренные данные и получить отчёт в форме таблиц или графиков.



Рис. 2.4. Хромель-алюмелевая термопара в защитном кожухе



а



б

Рис. 2.5. Используемое для исследования оборудование:  
а - термометр CENTER-309; б - инфракрасный термометр Testo 835-T2

В соответствии с паспортом на изделие – пирометр Testo 835-T2 погрешность измерения при подключенной термопаре К-типа составляет  $\pm(0,5\% + 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C})$ . В соответствии с паспортом на изделие – Center-309 погрешность измерения при подключенной термопаре К-типа составляет  $\pm(0,2 \% + 1 \text{ }^{\circ}\text{C})$ .

Для измерения температуры расплава в процессе затвердевания использовался высокотемпературный инфракрасный термометр Testo 835-T2 с подсоединённой к его аналоговому входу контактной термопарой К-типа. Данная хромель-алюмелевая термопара выполнена в защитном кожухе. Для изучения изменения длины дуги затвердевания расплава, дугообразный сегмент с матрицей был заменен на плуг, который позволял удалять застывший металл из канавки кристаллизатора. Для получения расплава использовалась муфельная печь сопротивления. На рис. 2.6 представлена оснастка установки с вмонтированным в нее плугом.

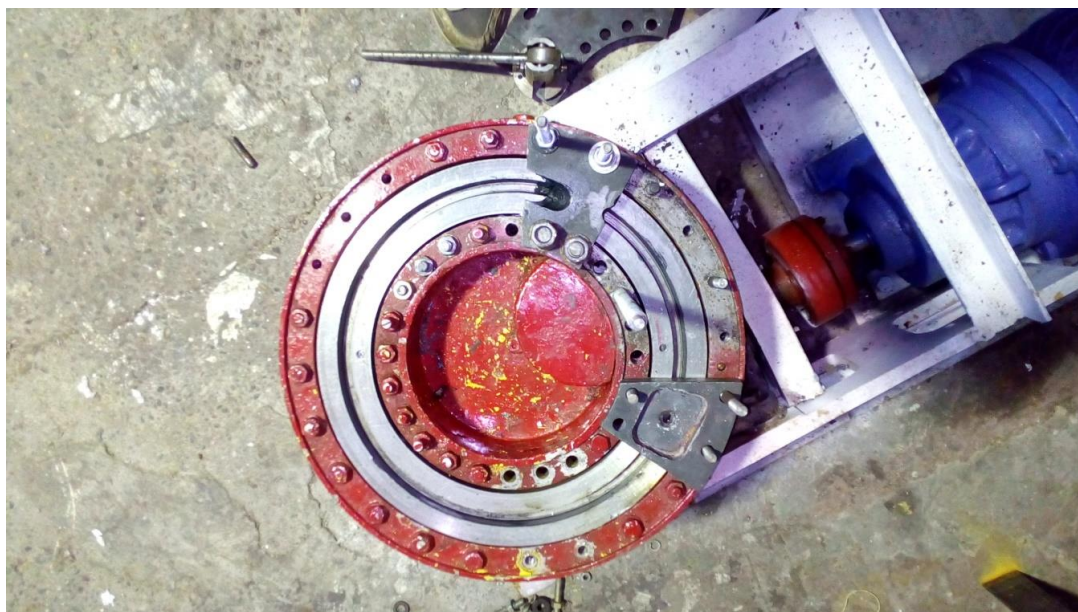


Рис. 2.6. Оснастка установки с ГК при исследовании изменения температуры расплава в процессе затвердевания

Исследование изменения дуги затвердевания расплава проводилось на опытных сплавах алюминия марки АД0, АД31 и АК12, физические характеристики которых представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Физические свойства опытных сплавов

Сплав	Температура, °С		Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , (Вт/м К) при $t = 20$ °С	Удельная теплоемкость $c$ , (Дж/кг К) при $t = 20$ °С	Плотность $\rho$ , (кг/м <sup>3</sup> ) при $t = 20$ °С
	ликвидус	солидус			
АД0	657	646	226	950	2705
АД31	655	615	188	921	2710
АК12	580	580	160	838	2650

Исследование изменения дуги затвердевания расплава проводилось в следующем порядке действий: производился демонтаж дугообразного сегмента с матрицей и замена его на плуг. Для исследования тепловых условий при прессовании, дугообразный сегмент с зачеканенными в него термопарами устанавливался на место, и проводилась новая серия экспериментов.

В электропечь сопротивления помещались тигли для плавления

алюминиевого сплава, а также дозатор и подставка для предварительного разогрева. По достижению алюминиевым сплавом необходимой температуры его выдерживали в печи в течение 5–6 минут. Разогретые детали быстро устанавливались в рабочее положение, чтобы не допустить замерзания расплава в начальный момент работы.

Производился холостой пуск установки для определения правильности монтажа подставки и направления вращения кристаллизатора. Скорость вращения составляет два оборота в минуту. Из плавильной печи извлекался и очищался от шлака тигель с расплавом, замерялась его температура. Далее расплавленный металл заливался в установленный на подставке разогретый тигель с дозатором и производилось заполнение канавки колеса кристаллизатора. По мере вращения колеса расплав охлаждался, его затвердевшая часть упиралась в плуг и выходила из канавки. Контактной термопарой каждую секунду измерялась температура расплава от места заливки до места выхода затвердевшего металла из канавки, после чего термопара вновь устанавливалась в месте заливки. В данном процессе температура составляла, °С: заливаемого расплава – 750, тигля с дозатором и подставкой – 746, окружающей среды – 20. Отметим, что колесо-кристаллизатор и плуг предварительно не нагревались. Длительность эксперимента составила 270 с, за которое колесо-кристаллизатор совершило 9 оборотов. Время эксперимента было ограничено объемом расплавленного металла. По мере вытекания из дозатора расплава алюминия в тигель добавлялся заранее расплавленный алюминий. Перед каждой серией экспериментов производилась очистка от грязи, и остатков металла с предыдущих запусков с поверхности кристаллизатора.

Изучение теплового состояния дугообразного сегмента в процессе прессования, производилось, только для сплава АК12, следующим образом: в теле дугообразного сегмента, по осевой дуге, устанавливаются хромель-алюмелевые термопары фиксирующие изменение температуры самого сегмента в процессе работы установки (см. рис. 2.1а). Термопары сопряжены

с аналоговыми входами термометра Center-309. По мере попадания закристаллизовавшегося сплава под неподвижный дугообразный сегмент, где под действием сил контактного трения между стенками кольцевой канавки и затвердевшим металлом происходит распрессовывание и выдавливание через рабочий канал матрицы пресс-изделия. Отвод избыточного тепла образовавшегося за счёт сил деформации металла и контактного трения частично происходит через дугообразный сегмент, который в процессе работы установки прогревается до довольно высоких температур. Соответственно термометром каждую секунду фиксируется изменение температуры в точках измерения. Температура пресс-изделия на выходе из матрицы фиксировалась инфракрасным пирометром Testo 835-T2.

### **2.3. Анализ результатов экспериментальных исследований процессов нестационарного теплообмена**

Результаты экспериментального исследования затвердевания алюминиевых сплавов АД31, АД0 и АК12 обобщены в виде графиков показывающих динамику изменения температуры расплава в процессе вращения (угла поворота  $\varphi$ ) колеса кристаллизатора, приведённых в Приложении А (рис. А.1–А.3).

На рис. А.1 красной штрих-пунктирной и красной линией изображена температура ликвидус и солидус соответственно для сплава АД31. Семейство кривых 1-9 выделено на графике попарно цветом, показывает изменение угла затвердевания и температуры расплава после пуска установки. Начало замера температуры находится на удалении от места заливки на  $30^\circ$ . Окончание в месте установки плуга, на удалении  $180^\circ$ . Нижняя кривая под цифрой 1 отображает изменение температуры расплава в момент прохождения кристаллизатором половины оборота. Две кривые под цифрой 1 соответствуют одному обороту. Всего девять оборотов. Эксперимент показал, что в начальный момент времени (после запуска установки) расплав



в результате теплового взаимодействия с холодным кристаллизатором мгновенно затвердевал. Кривые 1 располагаются ниже линии температуры солидуса и угол затвердевания  $\varphi_s$  составляет менее  $30^\circ$ . Однако при дальнейшей работе установки по мере прогрева кристаллизатора угол  $\varphi_s$  увеличивается и в конце 8-го оборота (верхняя кривая 8) составляет более  $170^\circ$ . Изменение температуры расплава на удалении от места заливки  $50^\circ$  происходит со скоростью  $0,23 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ , при достижении на заданном азимуте температуры солидуса –  $0,30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$  до достижения температуры ликвидус. Далее темп изменения скорости составляет  $0,23 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ .

На удалении от места заливки  $150^\circ$  изменение температуры расплава происходит со скоростью  $0,40 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ . При этом отмечено увеличение темпа прироста температуры в зоне фазового перехода из жидкого в твёрдое состояние до  $0,50 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ , что связано с выделением теплоты при фазовом превращении расплава.

На рис. А.2 красной штрих-пунктирной и красной линией изображена температура ликвидус и солидус соответственно для сплава АД0, где семейство кривых 1-9 показывает изменение угла затвердевания и температуры расплава после пуска установки.

Эксперимент показал, что в начальный момент времени (после запуска установки) расплав в результате теплового взаимодействия с холодным кристаллизатором мгновенно затвердевал. В отличие от сплава АД31, при литье расплава АД0, в течение семи оборотов металл затвердевает на начальном участке дуги при угле  $\varphi_s$  от места заливки, составляющем менее  $30^\circ$ . Однако по мере прогрева кристаллизатора угол  $\varphi_s$  увеличивается, достигая  $70^\circ$  при 9-ти оборотов колеса-кристаллизатора (270 с работы установки).

Скорость изменения температуры расплава на удалении от места заливки  $50^\circ$  и  $150^\circ$  составляет соответственно  $0,17$  и  $0,40 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ , при достижении на заданном азимуте температуры солидуса –  $0,27 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ .

Аналогичные графики получены и для сплава АК12 (см. рис. А.3).

Здесь красной линией изображена температура фазового перехода. Видно, что при литье расплава АК12 он затвердевает уже при трех оборотах кристаллизатора на участке дуги, не превышающем  $30^\circ$  от места заливки. Однако при дальнейшей работе установки (по мере прогрева кристаллизатора) угол  $\varphi_s$  увеличивается и на 9-ом обороте кристаллизатора составляет более  $170^\circ$ .

На рис. 2.7-2.9 для сплавов АД31, АД0 и АК12 показаны обобщенные зависимости температуры затвердевающего металла от угла поворота колеса-кристаллизатора.

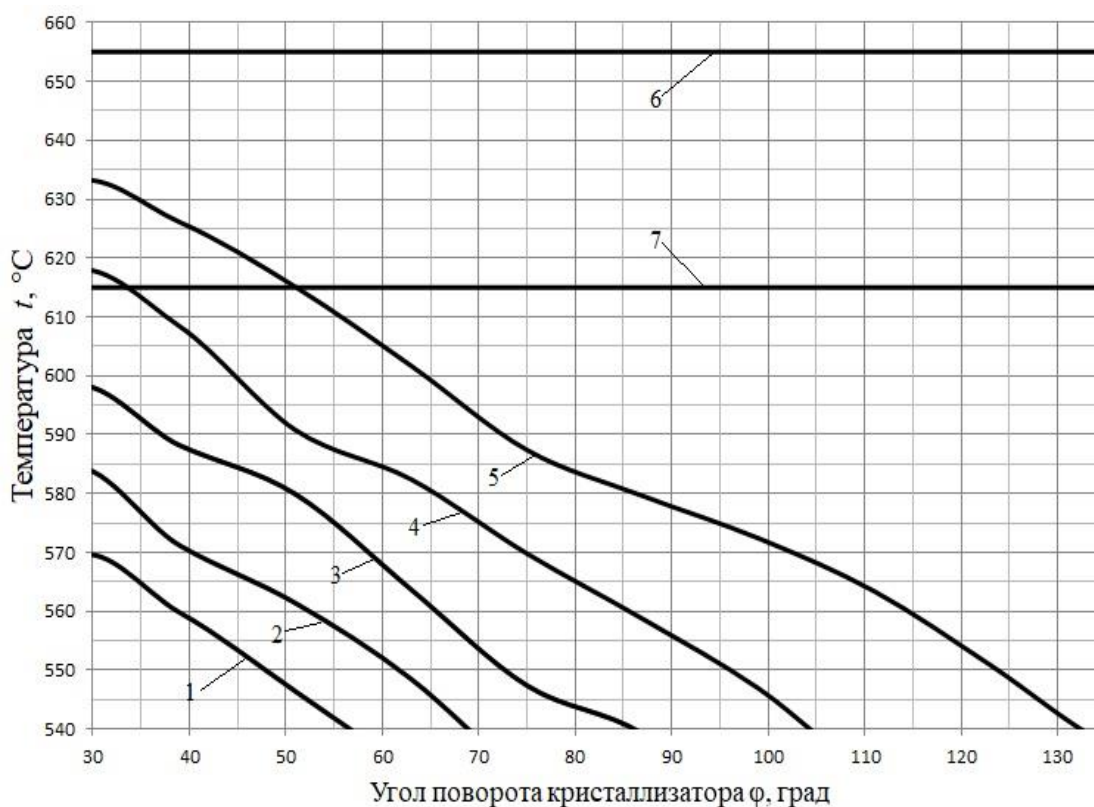


Рис. 2.7. Динамика изменения температуры затвердевающего расплава АД31 при различном угле поворота кристаллизатора: линии 1, 2, 3, 4 и 5 — соответственно 1, 2, 3, 4 и 5 оборотов кристаллизатора; 6 — линия ликвидус, 7 — линия солидус

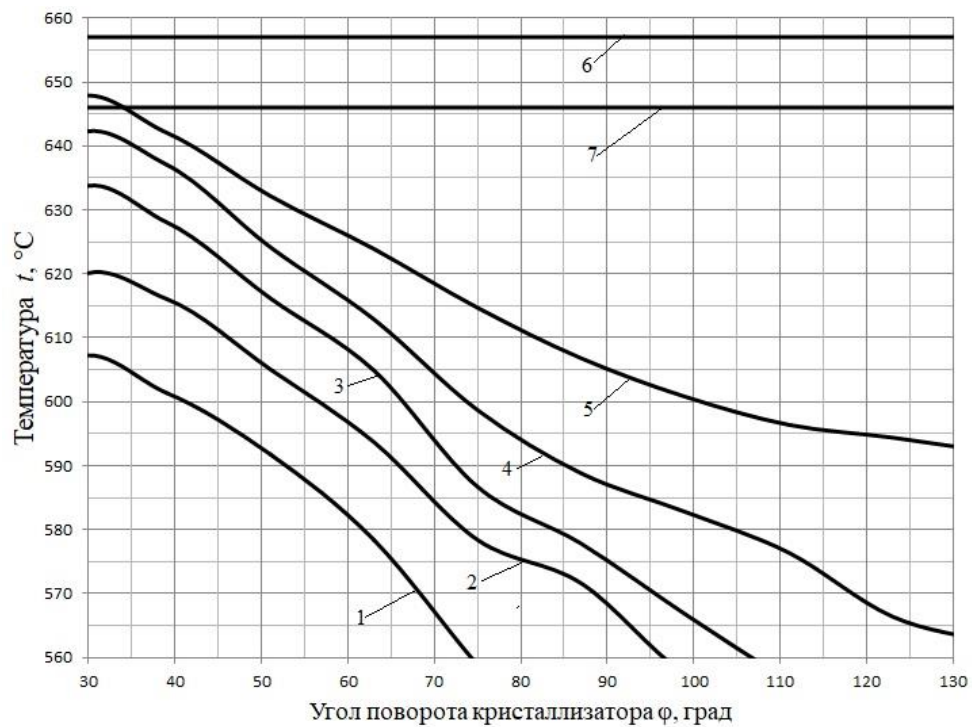


Рис. 2.8. Динамика изменения температуры затвердевающего расплава АД0 при различном угле поворота кристаллизатора: линии 1, 2, 3, 4 и 5 – соответственно 4, 5, 6, 7 и 8 оборотов кристаллизатора; 6 – линия ликвидус, 7 – линия солидус

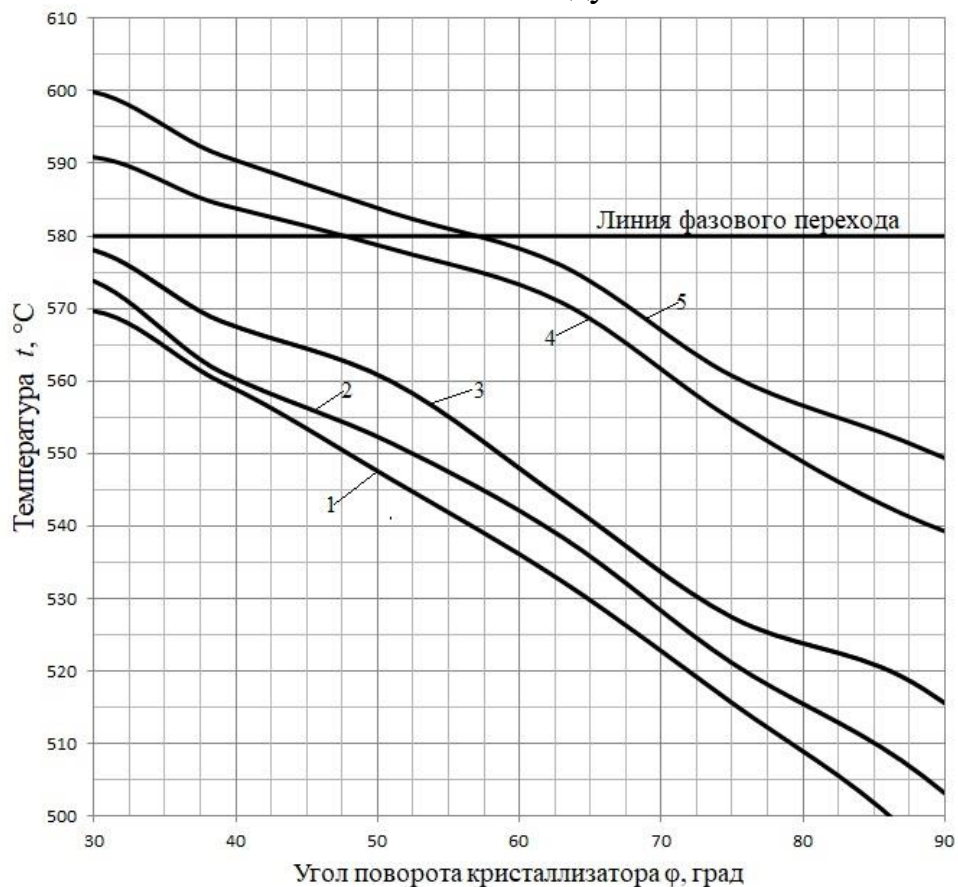


Рис. 2.9. Динамика изменения температуры затвердевающего расплава АК12 при различном угле поворота кристаллизатора: линии 1, 2, 3, 4 и 5 – соответственно 1, 2, 3, 4 и 5 оборотов кристаллизатора

На полученных графиках хорошо прослеживается взаимосвязь длины дуги затвердевания расплава от времени работы установки. Так, с каждым оборотом установки кривые изменяют свой угол наклона в сторону горизонтальной прямой, соответствующей температуре фазового перехода для сплава АК12 и линиям температуры солидус для сплава АД31 и АД0. Выше этих линий расплав находится в жидкой фазе, ниже – в твердой.

Таким образом, в начальный момент времени, соответствующий запуску установки, исследуемые расплавы в результате теплового взаимодействия с холодным кристаллизатором мгновенно затвердевали. Однако в условиях переходного теплового режима по мере работы установки в зоне затвердевания обрабатываемого металла изменяются условия теплообмена между кристаллизатором и заливаемым расплавом. В этом режиме происходит постепенный прогрев элементов установки и после каждого нового оборота кристаллизатор попадает в исходное место заливки расплава уже с другой температурой, соответственно происходит изменение угла затвердевания расплава  $\varphi_s$ .

Так, для сплава АД31, АД0 и АК12 переход расплавов из жидкой фазы в твердую происходит соответственно через 154, 212 и 159 с работы установки, что соответствует углу поворота кристаллизатора  $\varphi$  52°, 34° и 57° (см. кривая 5 на рис. 2.7-2.9).

На рис. 2.10 представлен график изменения температуры дугообразного сегмента в переходном тепловом режиме работы установки при обработке сплава АК12. Фиксация температуры в сегменте производилась каждую секунду во всех измеряемых точках.

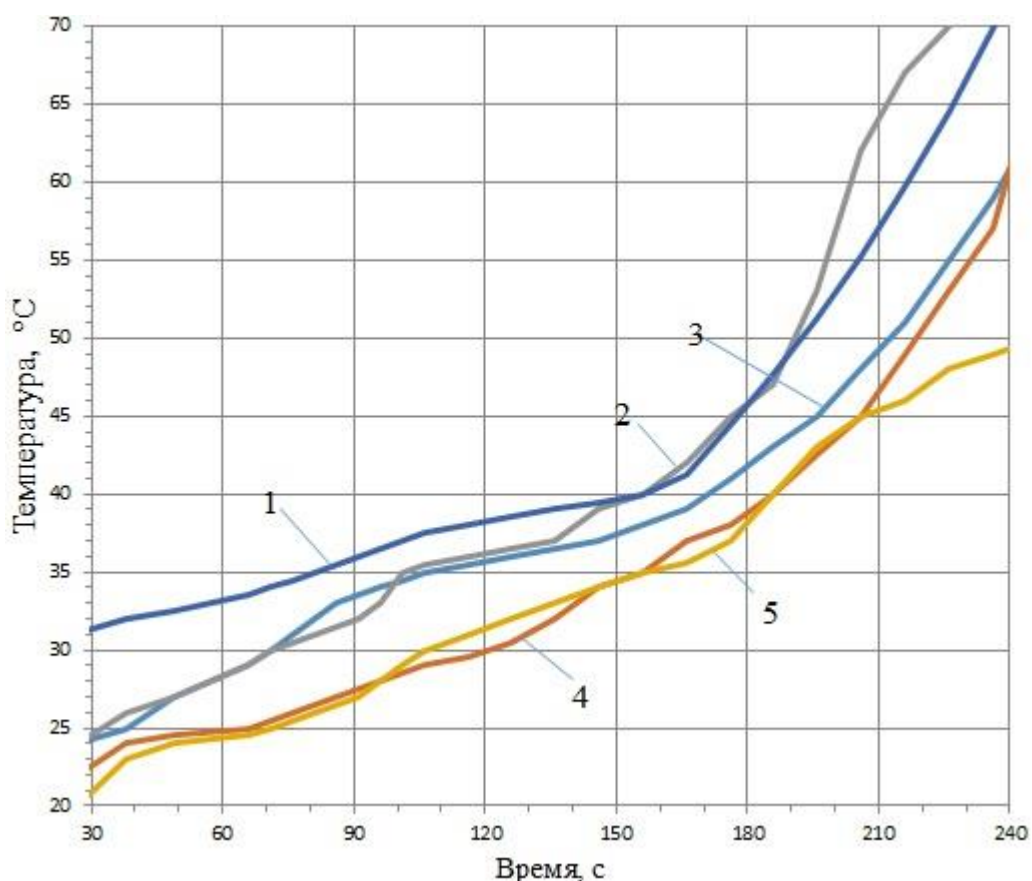


Рис. 2.10. Изменение температуры дугообразного сегмента и обрабатываемого расплава на выходе из матрицы в переходном тепловом режиме работы установки для сплава АК12:

- 1 – температура обрабатываемого расплава на выходе из матрицы;  
 2, 3, 4 и 5 температура в теле дугообразного сегмента соответственно в датчиках ТЗ, Т1, Т2 и Т4

Эксперимент проводился в течение 240 с. Темп роста температуры обрабатываемого сплава до 180 с работы установки составил приблизительно  $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , увеличиваясь по мере прогрева элементов до  $0,50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ .

Видно, что кривая 2, соответствующая датчику температуры ТЗ, имеет близкую к обрабатываемому металлу температуру. При этом пресс-изделие имеет достаточно низкую температуру. Связано это с тем, что холодный дугообразный сегмент поглощает достаточно большое количество теплоты, образующейся от сил контактного трения и деформации металла в процессе прессования.

В целом, эксперименты показали на необходимость проведения дальнейших теоретических исследований, направленных на изучение температурно-временных зависимостей процесса литья-прессования цветных

металлов в установке НСЛиП с ГК с целью определения рациональных конструктивных и режимных параметров ее работы.

#### **2.4. Выводы по главе 2**

1. Представлена конструкция опытно-промышленной установки с горизонтальным кристаллизатором и проведен анализ реализации в ней технологии НСЛиП.

2. Приведена методика проведения эксперимента и используемое оборудование для определения в переходном режиме работы установки температуры алюминиевого расплава и дугообразного сегмента, позволяющее определить длину дуги затвердевания металла в процессе вращения колеса-кристаллизатора.

3. Установлены температурно-временные зависимости литья-прессования алюминиевых сплавов различного состава в переходном режиме. Показано, что выход на стационарный тепловой режим сопровождается постепенным увеличением энтальпии металла с каждым оборотом кристаллизатора. Это обстоятельство может привести к превышению алюминиевыми сплавами температуры солидуса перед дугообразным сегментом или в зоне прессования металла.

4. Показано, что в начальный момент времени, соответствующий запуску установки, алюминиевые расплавы в результате теплового взаимодействия с холодным кристаллизатором мгновенно затвердевали. Определено, что на 5 обороте кристаллизатора (через 150 с после начала его вращения) переход расплава из жидкой фазы в твердую фазу для сплавов АД31 и АК12 происходит на удалении от места заливки при углах поворота кристаллизатора соответственно  $52^\circ$ ,  $57^\circ$ , для сплава АД0 – менее  $30^\circ$ .

5. Установлено, что, несмотря на постоянный внешний подвод теплоты от поступающего расплава, температура подставки дозатора постепенно уменьшается. В результате на стенках выходного сечения

дозатора происходит затвердевание расплава, что приводит вначале к сужению, а затем и полному перекрытию его отверстия. Поэтому для обеспечения работоспособности установки в начальном режиме ее работы требуется дополнительный подвод теплоты к дозатору.

### ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛООБМЕНА В УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ПРЕССОВАНИЯ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ КРИСТАЛЛИЗАТОРОМ

При решении задачи многофакторного исследования нового технического объекта требуется использование различных приближений и численных методов, позволяющих предсказать его поведение без проведения, как правило, дорогого и затруднительного эксперимента. В настоящее время, с развитием вычислительной техники и созданием современных программных продуктов, стало возможным широкое применение такого вида теоретического исследования, как компьютерное моделирование [98].

#### 3.1 Особенности построения расчетной сетки и доменов в модели

Для изучения тепловых процессов нестационарного теплообмена в установке НСЛиП с ГК разработана ее трехмерная компьютерная модель с использованием программного продукта Solid Works. Полученная геометрия, в точности повторяющая опытно-промышленный образец установки, описанный в главе 2, импортирована в программный комплекс ANSYS Workbench, где производится дальнейшая подготовка модели в ANSYS Meshing (рис. 3.1).

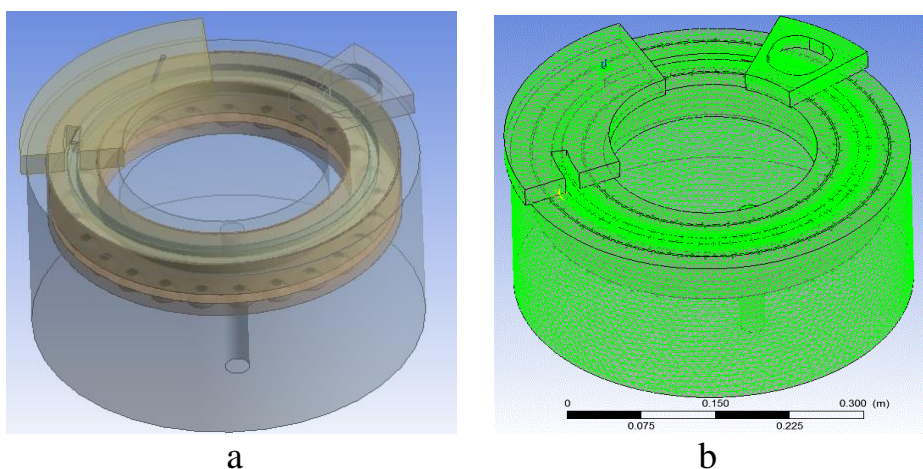


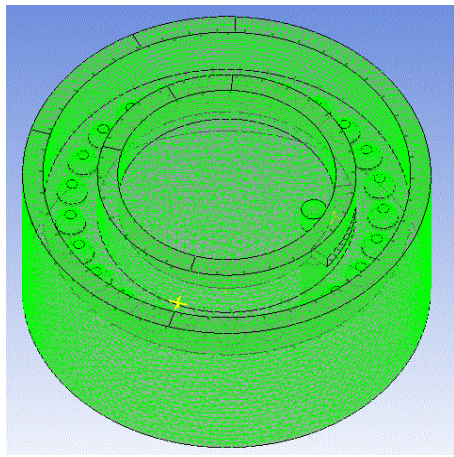
Рис. 3.1. Трёхмерная компьютерная модель установки НСЛиП с ГК:  
а – геометрия установки; б – расчётная сетка контрольных объёмов



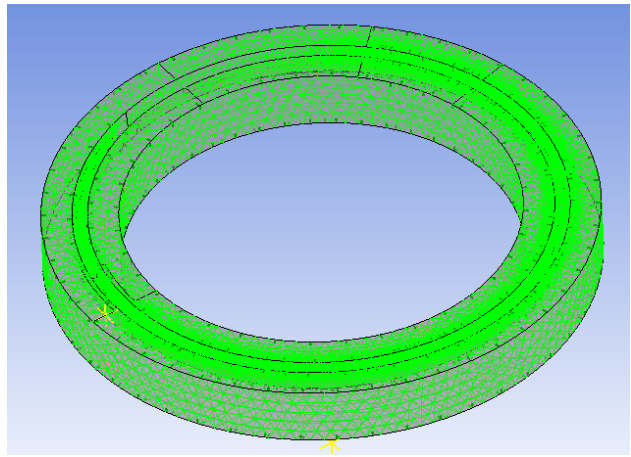
Процесс генерации сетки можно условно разделить на несколько этапов. В самом начале необходимо выполнить диагностику исходной геометрии, устранить обнаруженные ошибки или внести упрощения в расчетную модель. На втором этапе определяются общие настройки сеточного алгоритма, размеры элементов на выделенных поверхностях, зоны адаптации сетки - локального измельчения и прочее. После генерации сетки необходимо оценить её качество и размерность. В случае «вылета» сеточного алгоритма, необходимо определить причины отказа работы алгоритма и устранить их. Как правило, генератор сетки «вылетает» по двум причинам: из-за неправильных настроек сеточного алгоритма и из-за дефектов исходной геометрии.

Модель установки НСЛиП с ГК построена на основе решения сопряженной задачи теплообмена нескольких систем: системы «обрабатываемый металл – кристаллизатор»; системы «обрабатываемый металл – дугообразный сегмент»; системы «кристаллизатор – изоляционный слой – подшипники» при условии радиационно-конвективного теплообмена с окружающей средой всех элементов установки и в воздушной прослойке между стенками корпуса и кристаллизатора [99].

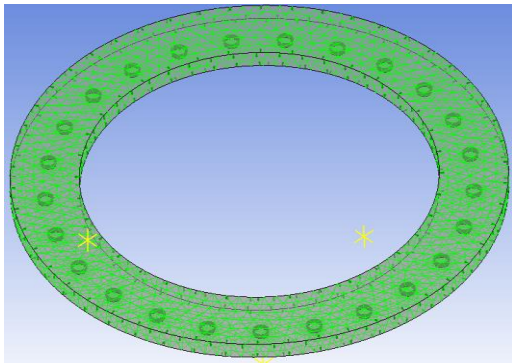
Для создания расчётной сетки установка разбивается на 8 доменов представленных на рис. 3.2. Корпус представлен доменом CORPUS, кристаллизатор – CRISTALLYZER, изоляционный слой между кристаллизатором и подшипниками – INSULATOR, дугообразный сегмент с матрицей – домен MATRIX, подставка с дозатором – домен PODSTAVKA, воздушная прослойка между корпусом и кристаллизатором – домен SOLID AIR. Металл разбивается на два участка, зона затвердевания – домен GROOVE, и зона прессования – домен GROOVE 2.



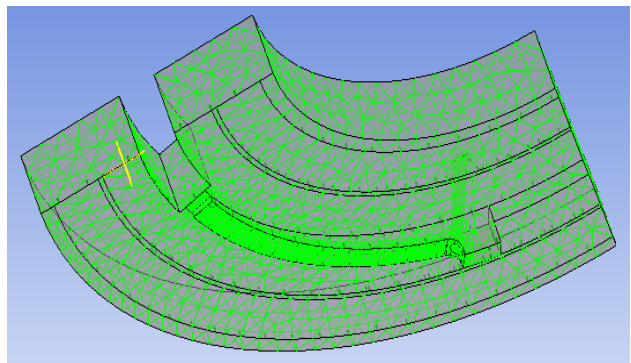
a



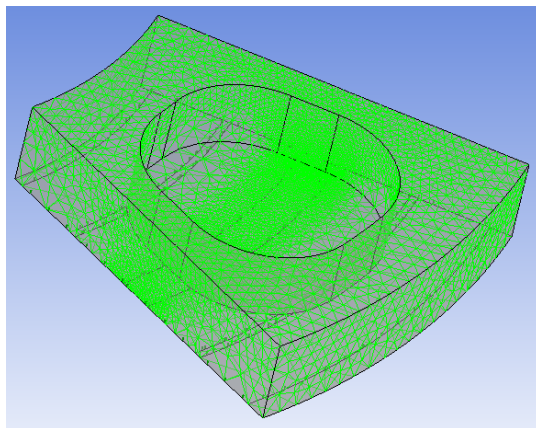
b



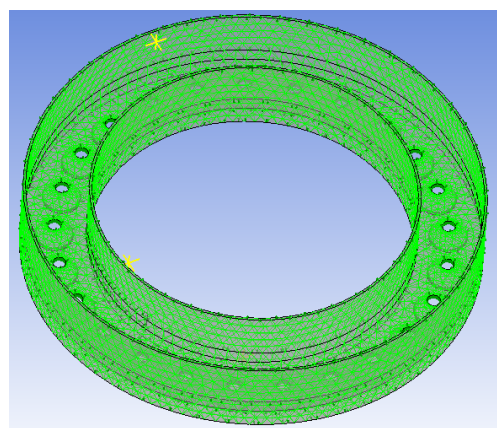
c



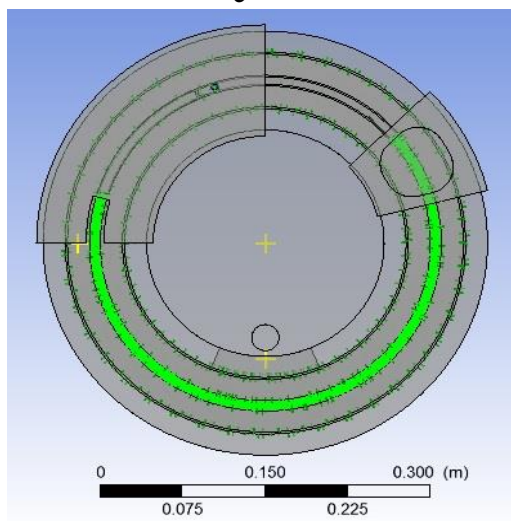
d



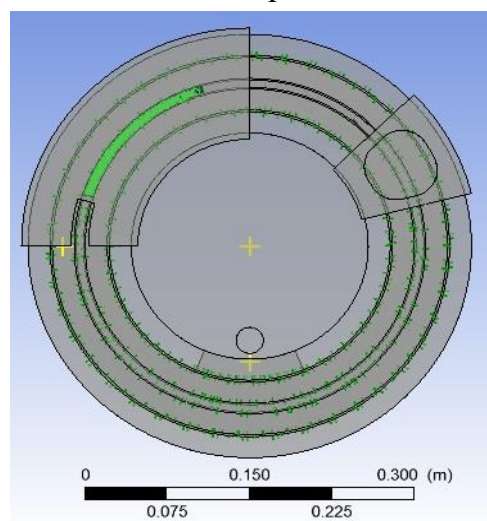
e



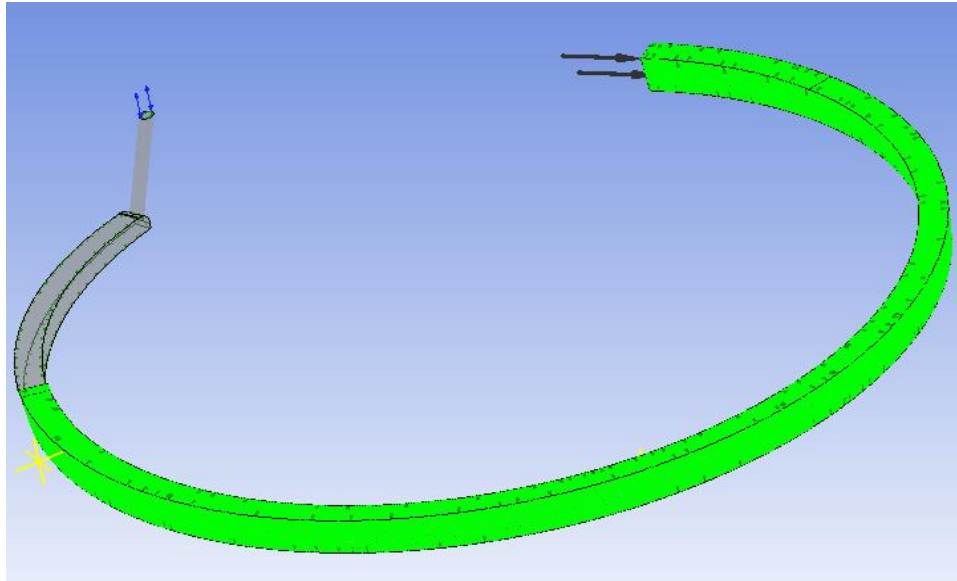
f



g



h



i

Рис. 3.2. Домены компьютерной модели:  
 a – домен CORPUS; b – домен CRISTALLYZER; c – домен INSULATOR;  
 d – домен MATRIX; e – домен PODSTAVKA; f – домен SOLID AIR;  
 g – домен GROOVE; h – домен GROOVE 2; i – целиком домен металла

Перед построением сетки, размечаются поверхности, на которых планируется наложить граничные условия, а также принимаются следующие обозначения доменов.

Для домена GROOVE и GROOVE 2: области входа и выхода металла; поверхность металла, контактирующая с воздухом, с поверхностью кристаллизатора в зоне затвердевания, с поверхностью кристаллизатора в зоне прессования, с поверхностью дугообразного сегмента с матрицей. Для домена CORPUS: внешние области, контактирующие с воздухом, внутренние области, контактирующие с воздухом в зазоре, места контакта корпуса с подшипниками, подставкой и дугообразным сегментом. Для домена CRISTALLYZER: внешние области, контактирующие с воздухом, внутренние области, контактирующие с воздухом в зазоре, область контакта с металлом в зоне затвердевания, область контакта с металлом в зоне прессования, область контакта с дугообразным сегментом и подставкой, область контакта с изоляционной вставкой. Для домена INSULATOR: область контакта с кристаллизатором, подшипниками и воздухом в зазоре.

Для домена MATRIX: внешние области, контактирующие с воздухом, область контакта с металлом в зоне прессования, область контакта с корпусом, кристаллизатором и воздухом в зазоре. Для домена PODSTAVKA: область подачи расплава, область контакта с расплавом, корпусом, кристаллизатором и воздухом в зазоре. Для домена SOLID AIR, в зазоре между корпусом и кристаллизатором: область контакта с корпусом, кристаллизатором, изоляционным слоем, подшипниками, подставкой, дугообразным сегментом и внешней средой.

Для построения расчетной сетки, в соответствии с рекомендациями [104, 105, 130], был применен автоматический генератор сеток на основе тетраэдров *Patch-Conforming* построенный на методе Делоне, который относится к методам «снизу вверх». С помощью данного метода сначала строится одномерная расчетная сетка линий геометрии, затем двухмерная сетка на поверхностях, после этого на основе полученной сетки создается трехмерная объемная расчетная сетка. Для автоматического измельчения сетки в интересующих элементах установки: металле, кристаллизаторе и дугообразном сегменте с матрицей была применена функция автоматического измельчения расчетной сетки *Size Function*. Данный инструмент был применен с настройкой *Proximity and Curvature* – измельчение сетки пропорционально кривизне поверхностей. Это позволило измельчить расчетную сетку, не выполняя многочисленных операций вручную.

Для доменов металла задаются призматические слои с использованием метода *Post* – призматические слои «врезаются» в существующую объемную сетку. Настройки размера призматических ячеек следующие: пристеночный слой размещается при помощи 10 слоёв на расстоянии 2 мм от стенки с коэффициентом роста 1,2. Размер ячейки внутри доменов металла составляет 0.8 мм. В остальных областях размер ячейки не фиксируется. В домене кристаллизатор, дугообразный сегмент и подставка задается сгущение сетки в месте контакта с обрабатываемым металлом, и задается пограничный слой

из трех ячеек на расстоянии 1 мм от стенки. Также для данных доменов установим параметр *Fine* в пункте *Relevance Center* отвечающий за степень измельчения сетки. Между доменами внутри расчетной области узлы стыкуются по правилу «узел-в-узел».

Размер сетки в итоговом расчете всей модели составил 3.7 млн. ячеек. Домен корпус (CORPUS) состоящий из 181088 элементов. Домен кристаллизатор (CRISTALLYZER) состоящий из 1899260 элементов. Домен изоляционный слой (INSULATOR) состоящий 38217 элементов. Домен дугообразный сегмент с матрицей (MATRIX) состоящий из 46705 элементов. Домен подставки дозатора (PODSTAVKA) состоящий из 251196 элементов. Домен воздушной прослойки между кристаллизатором и корпусом (SOLID AIR) состоящий из 23422 элементов. Домен обрабатываемого расплава разделён на два: (GROOVE) – участок от места заливки до дугообразного сегмента с матрицей (зона затвердевания), состоящий из 1074651 элемента и (GROOVE 2) – участок обрабатываемого металла, находящегося под дугообразным сегментом (зона прессования) и состоящий из 185461 элемента.

На основе полученной сеточной модели создается расчетная модель, путём наложения граничных и начальных условий, параметров моделируемых процессов и задания настроек решателя [100].

### **3.2 Принятые уравнения и краевые условия в модели**

Математическая модель теплообмена представляет собой систему дифференциальных уравнений сохранения энергии. Уравнение энергии включает члены, отвечающие за внутреннее тепловыделение при обработке сплава в процессе затвердевания и прессования.

Нелинейное трехмерное уравнение сохранения энергии для обрабатываемого металла и элементов установки записывалось в виде субстанциональной производной:

$$\rho_i c_i(T) \frac{DT_i}{d\tau} = \rho_i c_i(T) \frac{\partial T_i}{\partial \tau} + \rho_i c_i(T) w_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = \nabla(\lambda_i(T) \nabla T_i) + q_{\text{вн}i}, \quad (3.1)$$

где  $T_i = T_i(x, y, z, \tau)$  – поле температур в  $i$ -ом элементе;  $\rho_i$ ,  $c_i$  и  $\lambda_i$  – плотность, объёмная теплоёмкость и теплопроводность  $i$ -го элемента;  $w_i$  – скорость движения  $i$ -го элемента вдоль оси  $z$ ;  $q_{\text{вн}i}(x, y, z, \tau)$  – внутреннее тепловыделение при фазовом переходе в  $i$ -ом элементе [101].

Уравнение (3.1) дополняется краевыми условиями:

– начальными условиями, определяющими начальное распределение температуры элементов установки  $T_i$ :

$$T_i = T(x, y, z, \tau = 0) = T_{0i}(x, y, z); \quad (3.2)$$

– граничными условиями, формируемыми для различных граничных поверхностей  $\Gamma_i$ :

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\Gamma_i} = \pm q_i, \quad (3.3)$$

где  $q_i$  – условия радиационно-конвективного теплообмена на границе поверхности  $i$ -го элемента установки  $\Gamma_i$ ;  $q_i > 0$  – поток направлен внутрь элемента  $i$ .

В модели, согласно рекомендациям [106], граничные условия третьего рода (3.3) записывались в следующем общем виде:

$$q_i = \alpha_i (T_{\Gamma_i} - T_{\Gamma_{i+1}(0)}), \quad (3.4)$$

где  $\alpha_i$  – соответствующей данной поверхности  $\Gamma_i$  коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_{\Gamma_i}$  и  $T_{\Gamma_{i+1}(0)}$  – температуры  $i$ -той поверхности ( $\Gamma_i$ ) или окружающей среды ( $\Gamma_0$ ), К.

Внутренние тепловыделения при фазовом переходе характерны для домена с металлом «GROOVE» и «GROOVE2», для остальных элементов  $q_{внi} = 0$ . Скорость движения  $w_i$  относительно оси  $Z$  присуща вращающимся элементам изучаемой системы: кристаллизатора «CRISTALLYZER» и металла «GROOVE». Для остальных элементов  $w_i = 0$ .

Так как расплав обрабатываемого металла проходит две теплотехнические зоны (зоны кристаллизации расплава и прессования), то величина  $q_{внi}$  в уравнении (3.1) принимает вид:

$$q_{внi} = S'_h + S''_h, \quad (3.5)$$

где  $S'_h$  – внутреннее тепловыделение при фазовом переходе (учитывается при решении уравнения теплопроводности в домене «GROOVE» и «GROOVE 2»);  $S''_h$  – тепловыделение от сил контактного трения и сил деформации обрабатываемого металла (учитывается при решении уравнения теплопроводности в домене «GROOVE 2»).

В общем виде значение  $S'_h$  определяется выражением:

$$S'_h = \int_{T_{liq}}^{T_{sol}} c_p(T) dT + L. \quad (3.6)$$

В модели теплота затвердевания  $L$  отдельно не учитывалась, а включалась в величину эффективной теплоемкости  $c_{эф}$ . Эта величина является разрывной энергетической характеристикой тепловых процессов с фазовыми переходами, зависящей в зоне затвердевания от доли твердой фазы  $\psi$ . Принимая, что  $\psi$  зависит от локальной температуры  $T$  в условиях квазиравновесия, когда  $S'_h$  выделяется внутри интервала затвердевания, можно записать [107, 108]:

$$c_{\text{эф}}(T) = \begin{cases} c_{\text{ж}} & \text{при } T > T_{\text{liq}}; \\ c_{\text{ж}}(1 - \psi) + c_{\text{т}}\psi + L \frac{\partial \psi}{\partial T} & \text{при } T_{\text{sol}} \leq T \leq T_{\text{liq}}; \\ c_{\text{т}} & \text{при } T < T_{\text{sol}}. \end{cases} \quad (3.7)$$

Отметим, что для уточнения решаемой задачи в уравнение (3.1) вводится величина эффективного коэффициента теплопроводности  $\lambda_{\text{эф}}$ , который также считается функцией доли твердой фазы  $\psi$ :

$$\lambda_{\text{эф}}(T) = \begin{cases} \lambda_{\text{ж}} & \text{при } T > T_{\text{liq}}; \\ \lambda_{\text{ж}}(1 - \psi) + \lambda_{\text{т}}\psi & \text{при } T \leq T_{\text{liq}}; \\ \lambda_{\text{т}} & \text{при } T < T_{\text{sol}}. \end{cases} \quad (3.8)$$

При моделировании теплообмена между корпусом и кристаллизатором (домен «SOLID AIR») тепловой поток  $q_i$ , передаваемый через цилиндрический воздушный зазор от внешней поверхности кристаллизатора к внутренней поверхности корпуса, определяется по уравнению (3.4), где величина  $\alpha_i$  имеет вид:

$$\alpha_i = \lambda_{\text{в}} / \delta_3 + \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \frac{[(T_{\text{Г1}} / 100)^4 - (T_{\text{Г2}} / 100)^4]}{(T_{\text{Г1}} - T_{\text{Г2}})}. \quad (3.9)$$

Здесь  $\lambda_{\text{в}}$  – теплопроводность воздуха;  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты системы из двух поверхностей (корпуса и кристаллизатора);  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $\delta_3$  – ширина воздушного зазора;  $T_{\text{Г1}}$  и  $T_{\text{Г2}}$  – температуры кристаллизатора и корпуса.

Отметим, что перенос теплоты внутри твердых тел (домены «CORPUS», «CRISTALLYZER», «MATRIX», «PODSTAVKA» и «INSULATOR») описывается в модели уравнением теплопроводности.

При моделировании теплового процесса граничные условия третьего рода (3.4) формируются для поверхностных границ  $\Gamma_i$  в осевых направлениях Z и X поперечного сечения установки (рис. 3.3).



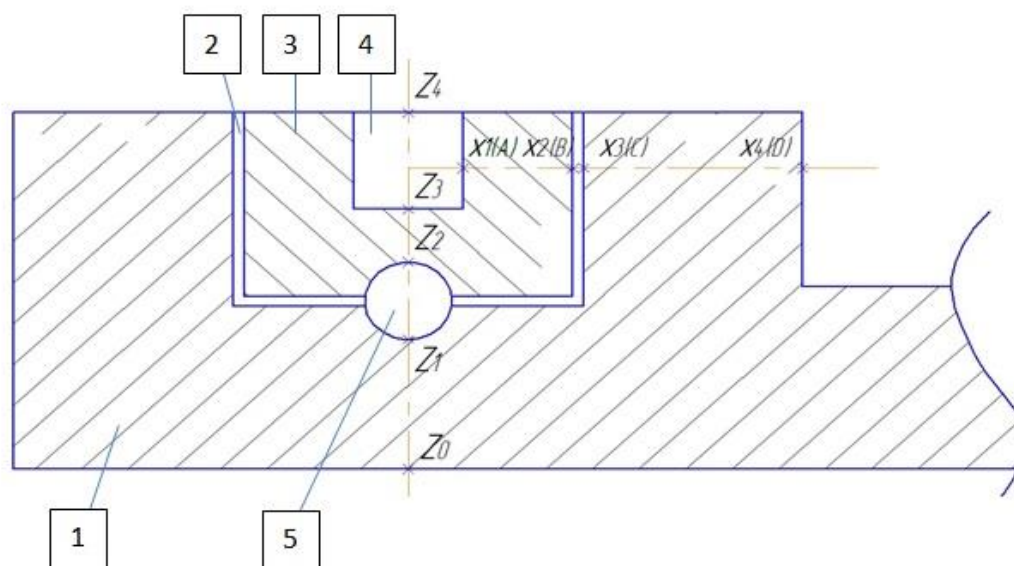


Рис. 3.3. Схема к определению в модели граничных условий:

1 – корпус; 2 – воздушный зазор между корпусом и кристаллизатором; 3 – кристаллизатор; 4 – канавка кристаллизатора с расплавом; 5 – подшипник

На схеме индексы  $i$  в координатах  $Z_i$  и  $X_i$  указывают на соответствующую поверхность  $\Gamma_i$  и условия ее теплообмена в установке:

– 0, 1, 2, 3 и 4 в направлении  $Z$  представляет теплообмен между соответственно корпусом и окружающей средой ( $Z_0$ ), корпусом и подшипником ( $Z_1$ ), подшипником и кристаллизатором ( $Z_2$ ), канавкой кристаллизатора и расплавом ( $Z_3$ ), кристаллизатора с расплавом и окружающей средой ( $Z_4$ );

– 1, 2, 3 и 4 в направлении  $X$  представляет теплообмен между соответственно канавкой кристаллизатора и расплавом ( $X_1$ ), кристаллизатором и корпусом через воздушную прослойку ( $X_2, X_3$ ), корпусом и окружающей средой ( $X_4$ ) [100].

Таким образом, для приведенных выше граничных поверхностей  $\Gamma_i$  значение  $\alpha_i$  в уравнении (3.4) определялось или как линейное, учитывающее только конвективную составляющую теплообмена (поверхности  $Z_1, Z_2, Z_3, X_1, X_3$ ), или как нелинейное, учитывающее конвективную и лучистую составляющие теплообмена (поверхности  $Z_0, Z_4, X_2, X_4$ ). В последнем случае

$\alpha_i$  представляет собой сумму коэффициентов теплоотдачи конвекцией  $\alpha_{i,k}$  и излучением  $\alpha_{i,l}$ :

$$\alpha_i = \alpha_{i,k} + \alpha_{i,l} = \alpha_{i,k} + \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \frac{[(T_{Г1}/100)^4 - (T_{Г2}/100)^4]}{(T_{Г1} - T_{Г2})}. \quad (3.10)$$

Домен «GROOVE» и «GROOVE 2» описывается при помощи модели несжимаемой жидкости, решается система уравнений Навье-Стокса для ламинарного течения жидкости и уравнение теплопроводности. Причём в объёме домена «GROOVE 2» задается выделение объемного источника теплоты в зависимости от температуры обрабатываемого сплава (теплота, выделяемая от пластической деформации). На поверхности домена «GROOVE 2» задается поверхностный источник теплоты (теплота, выделяемая от трения о стенки кристаллизатора и дугообразный сегмент). Учёт тепловыделения от сил контактного трения и сил деформации обрабатываемого металла учитывался в модели за счет добавления объемного источника теплоты [104]:

$$S_h^v = q_{\text{тр}} + q_d. \quad (3.11)$$

Здесь  $q_{\text{тр}}$  – тепловыделение от преодоления сил контактного трения с неподвижным инструментом и стенками кристаллизатора (поверхностный источник тепловыделений);  $q_d$  – тепловыделение от работы пластической деформации (объемный источник тепловыделения для прессования с боковым истечением деформируемого металла):

$$q_d = \sigma_s(T, \varepsilon, \xi)(1,45\lambda + 0,8)b^2\lambda v_0, \quad (3.12)$$

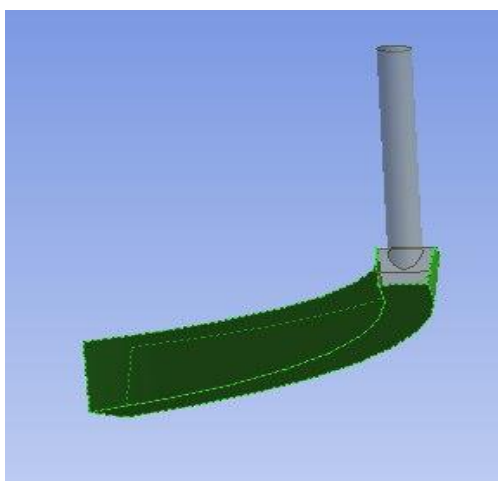
где  $\lambda$  – коэффициент вытяжки;  $b$  – ширина канавки колеса;  $v_0$  – скорость подачи заготовки в контейнер;  $\sigma_s(T, \varepsilon, \xi)$  – сопротивление деформации материала заготовки.

Теплота от преодоления сил трения определяется выражением [105]:

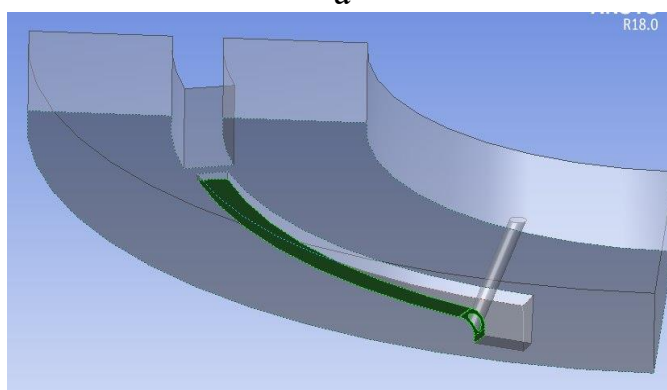
$$q_{\text{тр}} = 4b\sigma_s(T, \varepsilon, \xi)\mu R\varphi v_0, \quad (3.13)$$

где  $R$  – средний радиус по ширине канавки колеса кристаллизатора;  $\mu$  – коэффициент трения.

В модели теплота от преодоления сил контактного трения учитывается путем задания на поверхности обрабатываемого сплава в зоне прессования (домен «GROOVE 2») источника тепловыделения. Площади поверхности, контактирующей с кристаллизатором и дугообразным сегментом составляют 0,000561 и 0,00357 м<sup>2</sup> соответственно (рис. 3.4).



а



б

Рис.3.4. Поверхности контактного трения:  
а – поверхность, контактирующая с кристаллизатором; б – поверхность, контактирующая с дугообразным сегментом

Следует отметить, что уравнения (3.12) и (3.13) справедливы для стационарных температурных условий, установившихся в процессе непрерывного прессования либо естественным путем в результате конвективного теплообмена инструмента и окружающей среды, или с помощью принудительного охлаждения инструмента, заготовки и пресс-изделия. Поэтому ввиду небольшой площади контакта было введено следующее допущение: трение задаётся при средней температуре между поверхностью затвердевшего металла и поверхностью контактирующего элемента установки. Так как теплота от преодоления сил деформации металла является объёмным источником, то в домене «GROOVE 2» дополнительно задаётся тепловыделение при средней температуре данного домена. Пользуясь уравнениями (3.12), (3.13) и принимая температуру стационарного режима в диапазоне от 250 до 585 °С с шагом в один градус, были получены используемые при моделировании литья-прессования зависимости изменения тепловыделения от преодоления сил контактного трения и деформации обрабатываемого сплава (рис. 3.5 и 3.6).

В модели дополнительно задаются функции, определяющие теплофизические характеристики обрабатываемого расплава в зависимости от его текущей температуры: теплопроводность, теплоемкость, плотность, коэффициент поверхностного натяжения. При этом функциональная зависимость учитывает изменение теплоемкости и теплопроводности расплава при выделении скрытой теплоты его фазового превращения.

Для учета в модели теплообмена от зеркала расплава, с поверхности домена «GROOVE», контактирующей с воздухом задается суммарный коэффициент теплоотдачи рассчитанный по инженерной методике [108].

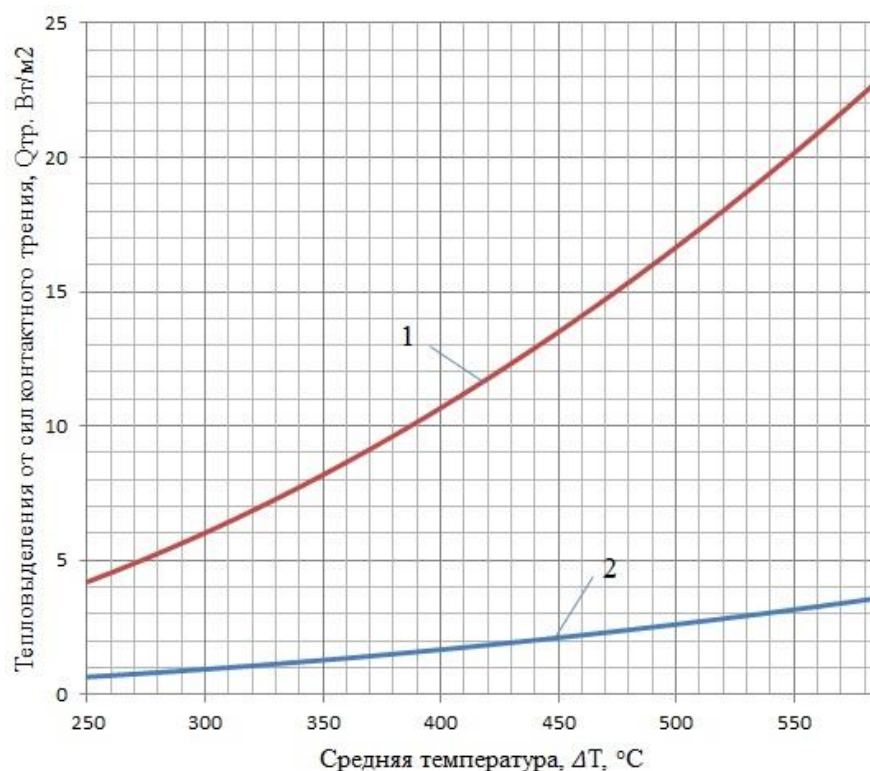


Рис. 3.5. Тепловыделение от сил контактного трения при обработке алюминиевых сплавов:

- 1 – тепловыделение на поверхности, контактирующей с кристаллизатором;
- 2 – тепловыделение на поверхности, контактирующей с дугообразным сегментом

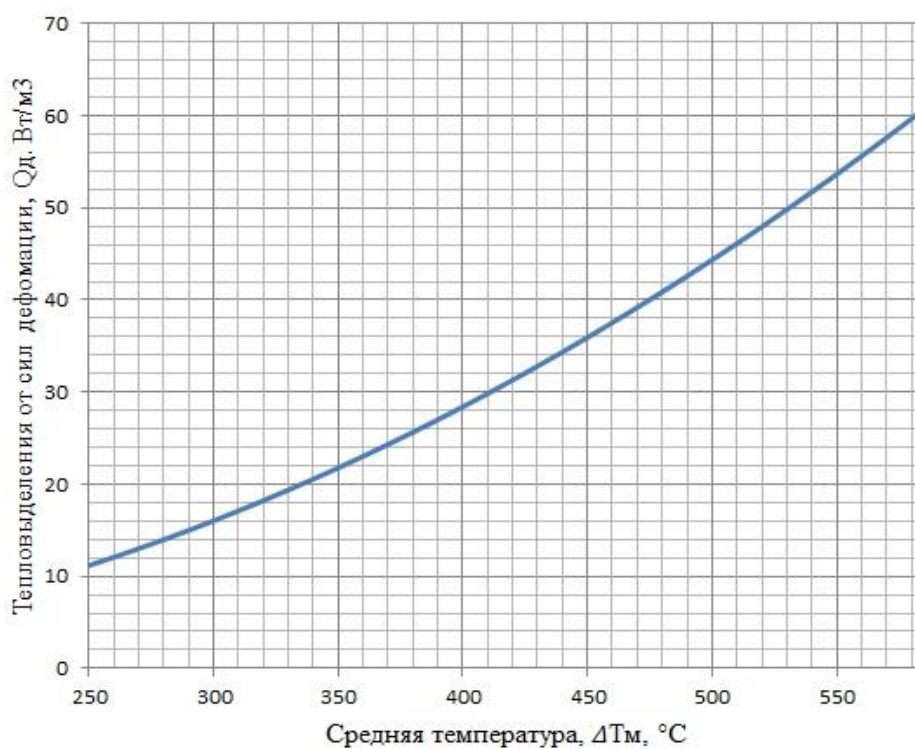


Рис. 3.6. Тепловыделение от преодоления сил деформации обрабатываемого алюминиевого сплава

Суммарный коэффициент теплоотдачи от зеркала расплава  $\alpha_{\text{сумм}}$  рассчитывается в соответствии с уравнением

$$\alpha_{\text{сумм}} = \alpha_{\text{к}} + \frac{\left( \varepsilon_{\text{пр}} \cdot c_0 \cdot \left( \left( \frac{T_{\text{р}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{в}}}{100} \right)^4 \right) \right)}{T_{\text{р}} - T_{\text{в}}}, \quad (3.14)$$

где  $\alpha_{\text{к}}$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией от зеркала расплава,  $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,12$  – приведённая степень черноты [130],  $c_0$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $T_{\text{р}}$  – температура расплава,  $T_{\text{в}}$  – температура воздуха.

Величина  $\alpha_{\text{к}}$  рассчитывается в соответствии с известными уравнениями теории подобия:

$$\alpha_{\text{к}} = Nu \cdot \lambda / L, \quad (3.15)$$

где  $Nu$  – число Нуссельта,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха;  $L$  – характерный размер (ширина канавки кристаллизатора, равная 0,01 м).

Число Нуссельта определяется в соответствии с уравнением

$$Nu = |c \cdot (Gr \cdot Pr)^n|, \quad (3.16)$$

где  $Gr$  и  $Pr$  – числа Грасгофа и Прандтля.

Число Грасгофа определяется в соответствии с уравнением

$$Gr = \beta \cdot L^3 \cdot g \cdot \frac{(T_{\text{р}} - T_{\text{в}})}{\nu^2}, \quad (3.17)$$

где  $\beta$  – температурный коэффициент объёмного расширения,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха,  $T_{\text{р}}$  – температура расплава,  $T_{\text{в}}$  – температура воздуха.

В расчетах получены значения коэффициентов  $\alpha_{\text{к}}$  и  $\alpha_{\text{сумм}}$  равными соответственно 16,4 и 25,4 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Для учета теплообмена в зазоре между корпусом и кристаллизатором, воздушная прослойка, моделируется твердым доменом «SOLID AIR», в котором решается только уравнение энергии. Плотность и теплоемкость материала соответствуют плотности и теплоемкости воздуха. Теплопроводность материала принята равной 0,13 Вт/(м·К) и включает в себя кондуктивную, конвективную и лучистую составляющие теплообмена. В частности, для расчета теплового потока через стенку были использованы соотношения с учетом значения эффективного коэффициента теплопроводности  $\lambda_{эфф}$  [109]:

$$q = \varepsilon\delta(T_1^4 - T_2^4) + \frac{\lambda}{\delta}(T_1 - T_2) = \frac{\lambda_{эфф}}{\delta}(T_1 - T_2), \quad (3.18)$$

$$\lambda_{эфф} = \varepsilon c_0 \delta \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{(T_1 - T_2)} + \lambda_{в}, \quad (3.19)$$

где,  $\lambda_{в}$  – теплопроводность воздуха;  $\varepsilon$  – степень черноты поверхности;  $c_0$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $\delta$  – ширина зазора;  $T_1$  и  $T_2$  – температура внешней поверхности кристаллизатора и температура внутренней поверхности корпуса, которые принимаются из предыдущих теплотехнических расчетов.

Коэффициент теплообмена между корпусом установки и окружающим воздухом принят равным 10 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Степень черноты поверхности 0.5.

Вращающийся кристаллизатор (домен CRISTALLYZER) переносит затвердевающий расплав до дугообразного сегмента с матрицей. Для моделирования этого процесса в компьютерной модели задается вращение обрабатываемого металла. При этом используется модель подвижной стенки, путем учета в каждой пристеночной ячейке вектора скорости, соответствующего принятому темпу вращения (в расчетах 2 об/мин). Для кристаллизатора и изоляционного слоя задавался аналогичный по величине и направлению вектор скорости, моделируя, таким образом, их вращение.

### 3.3 Методика задания краевых условий в расчетных доменах

Задание начальных и граничных условий в меню *CFX-Pre*, производится следующим образом: вкладка *Simulation* → *Analysis Type* → задается значением *Transient* и выбирается время (*Total Time*) и шаг (*Time steps*) расчёта. В дереве проекта выбирается домен *Corpus*. На рис. 3.7 выделены используемые поверхности для задания параметров задачи.

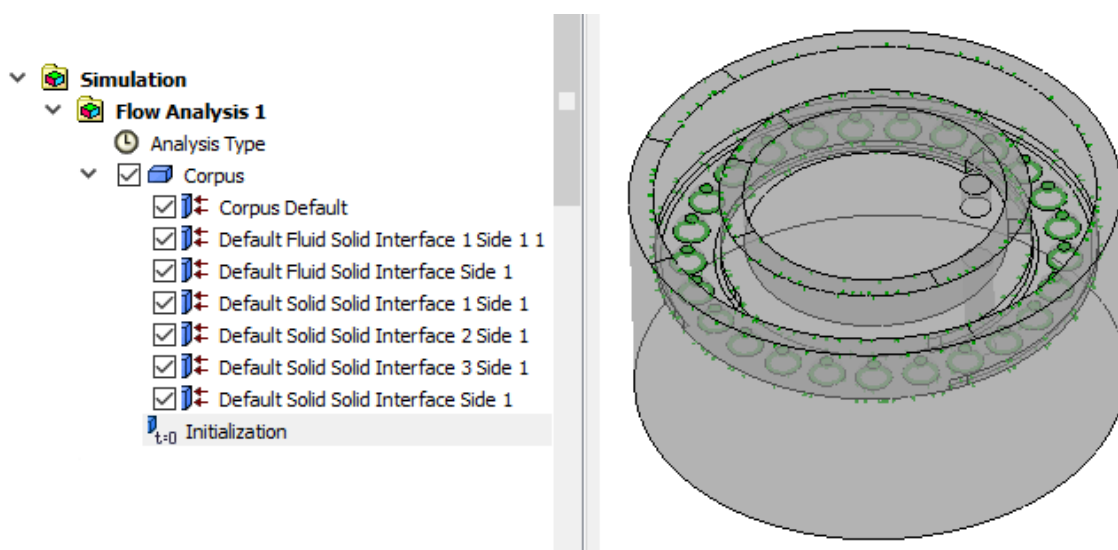


Рис. 3.7. Поверхности домена *Corpus* для задания параметров задачи

Во вкладке *Basic Settings* выбирается тип домена и материал корпуса. В данном случае *Domain Type* → *Solid Domain*; *Material* → *Steel*. Так как корпус не вращается, а находится в стационарном положении и не изменяет своей формы, задается *Domain Models* → *Domain Motion* → *Stationary*, *Mesh Deformation* → *None*. Далее производится переход на вкладку *Solid Models* и задается решение уравнения энергии внутри рассматриваемого домена *Heat Transfer* → *Thermal Energy*.

Для тепловых расчётов в Ansys CFX при моделировании излучения от нагретых поверхностей в окружающую среду рекомендуется пользоваться универсальным методом Монте-Карло [134]. Поэтому производится задание следующих параметров: *Thermal Radiation* → *Monte Carlo*, *Transfer Mode* → *Participating Media*, *Spectral Model* → *Gray*.



Во вкладке *Initialization* задается начальная температура домена *Initial Conditions* → *Temperature* → 20 °C. Выбирается *Corpus Default*, представляющий собой все внешние поверхности корпуса, задаются граничные и начальные условия (*Basic Settings* → *Boundary Type* → *Wall*; *Boundary Details* → *Heat Transfer* → *Heat Transfer Coefficient* → 10 Вт/м<sup>2</sup>К), а также температура окружающего пространства *Outside Temperature*. При этом излучение от корпуса принимается как излучение серого тела со степенью черноты 0,5, (параметр *Thermal Radiation* → *Opaque*, *Emissivity* → 0,5). Остальные поверхности, контактирующие с другими элементами установки и не имеющими контакт с воздухом: *Basic Settings* → *Boundary Type* → *Interface*; *Boundary Details* → *Heat Transfer* → *Conservative Interface Flux*; *Thermal Radiation* → *Conservative Interface Flux*.

На рис. 3.8 выделены используемые в домене *Cristallyzer* поверхности для задания параметров задачи.

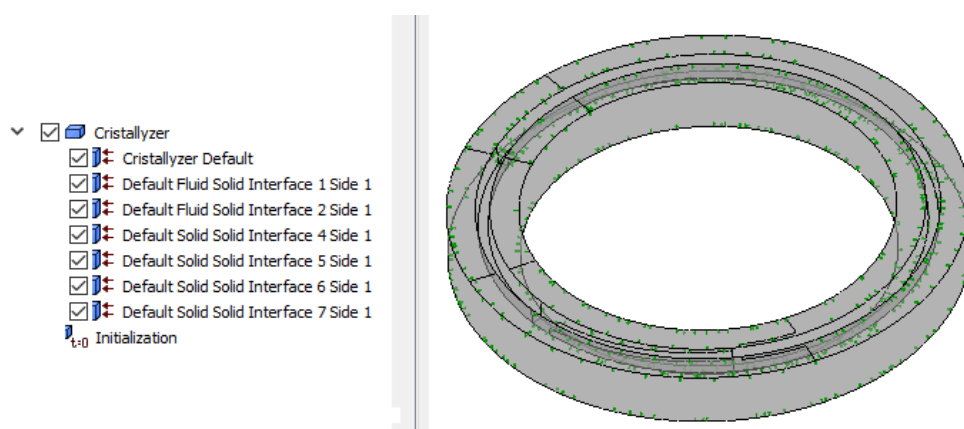


Рис. 3.8. Поверхности домена *Cristallyzer* для задания параметров задачи

Во вкладке *Basic Settings* выбирается тип домена и материал кристаллизатора: *Domain Type* → *Solid Domain*; *Material* → *Steel*. Так как кристаллизатор вращается со скоростью 2 об/мин, то задается его вращение относительно оси Z: *Domain Models* → *Domain Motion* → *Rotating*, *Angular Velocity* → 0,2094 rad/s; *Axis Definition* → *Option* → *Coordinate Axis*, *Rotation Axis* → *Global Z*.

Настройки вкладки *Solid Models* и *Initialization* такие же, как и описанные выше для домена *Corpus*. Выбирается *Cristallizer Default*, представляющий собой все внешние поверхности кристаллизатора, контактирующие с воздухом, кроме воздушного зазора установки. Задаются граничные и начальные условия (*Basic Settings* → *Boundary Type* → *Wall*, *Frame Type* → *Rotating*; *Boundary Details* → *Heat Transfer* → *Heat Transfer Coefficient* → 10 Вт/(м<sup>2</sup>·К)), а также температура окружающего пространства (*Outside Temperature* → 20 °С). Излучение от поверхностей принимается как излучение серого тела со степенью черноты 0,5 (параметр *Thermal Radiation* → *Opaque*, *Emissivity* → 0,5). Остальные поверхности, контактирующие с другими элементами установки и не имеющими контакт с воздухом задаются аналогично, как рассмотрено выше при задании параметров домена *Corpus*: *Basic Settings* → *Boundary Type* → *Interface*; *Boundary Details* → *Heat Transfer* → *Conservative Interface Flux*; *Thermal Radiation* → *Conservative Interface Flux*. Поверхности кристаллизатора контактирующие непосредственно с металлом *Default Fluid Solid Interface 1 Side 1* и *Default Fluid Solid Interface 2 Side 1*: *Basic Settings* → *Boundary Type* → *Interface*; *Boundary Details* → *Heat Transfer* → *Conservative Interface Flux*; *Thermal Radiation* → *Opaque*, *Emissivity* → 1.

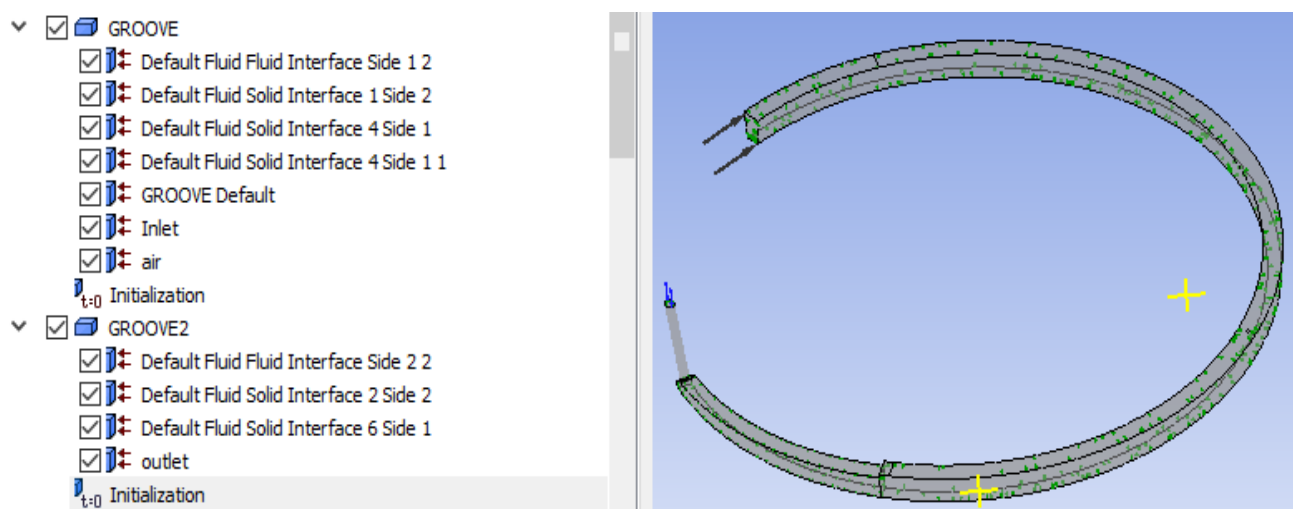


Рис. 3.9. Поверхности домена *Groove* и *Groove 2* для задания параметров задачи

В дереве проекта выбираются домены *Groove* и *Groove2* (рис. 3.9). Во вкладке *Basic Settings* выбирается тип домена и характеристики обрабатываемого сплава: *Domain Type* → *Fluid Domain*; *Material* → *Liquid Aluminum*, *Morphology* → *Continuous Fluid*; *Domain Models* → *Reference Pressure = 1 [atm]*; *Buoyancy Model* → *Non Buoyant*; *Domain Motion* → *Stationary*. Настройки вкладки *Fluid Models* → *Multiphase* → ставится галочка *Homogeneous Model*, *Free Surface Model* → *None*. *Heat Transfer* → ставится галочка *Homogeneous Model*, *Option* → *Thermal Energy*, *Turbulence* → *Option* → *k-Epsilon*.

Далее производится переход к вкладке *Fluid Pair Models* → *Interphase Transfer* → *Option* → *Mixture Model*, *Interface Len. Scale = 1 [mm]*. Если массообмен отсутствует, то *Mass Transfer* → *Option* → *None*.

Настройки вкладки *Initialization: Initial Conditions* → *Velocity Type = Cartesian*; *Cartesian Velocity Components = Automatic*; *Static Pressure* → *Option = Automatic with Value*; *Temperature* → *Option = Automatic*; *Turbulence* → *Option = Medium (Intensity = 5 %)*.

Перемещение алюминиевого расплава вместе с кристаллизатором моделируется в данных доменах путём задания массового расхода алюминия на входной поверхности *Inlet* и *Outlet*. На поверхности *Inlet* во вкладке *Basic Settings* → *Boundary Type* → *Inlet*; *Boundary Details* → *Flow Regime* → *Option = Subsonic*; *Mass And Momentum* → *Option = Bulk Mass Flow Rate*, *Mass Flow Rate = 0,009 [kg/s]* (в качестве примера, для алюминия марки АК-12). *Flow Direction* → *Option* → *Normal to Boundary Condition*; *Turbulence* → *Option = Medium (Intensity = 5 %)*; *Heat Transfer* → *Option* → *Static Temperature*, *Static Temperature = 750 [°C]*.

На поверхности *Inlet* во вкладке *Basic Settings* → *Boundary Type* → *Opening*, *Location = outlet*; *Boundary Details* → *Flow Regime* → *Option = Subsonic*; *Mass And Momentum* → *Option = Opening Pres. And Dirn.* *Flow Direction* → *Option* → *Normal to Boundary Condition*; *Turbulence* → *Option =*

*Medium (Intensity = 5 %); Heat Transfer → Option → Opening Temperature, Opening Temperature = 25 [°C].*

Поверхность металла домена *Groove*, контактирующая с воздухом «air» во вкладке *Basic Settings → Boundary Type → Wall, Location = opening air; Boundary Details → Mass And Momentum → Option = Free Slip Wall; Heat Transfer → Option = Wall Heat Transfer Coefficient; Heat Trans. Coeff. = 25 Вт/(м<sup>2</sup>·К)*. Расчет данного коэффициента теплоотдачи от зеркала расплава приведен выше. Принимается *Outside Temperature = 25 [°C]*.

Для поверхностей расплава домена *Groove*, контактирующего с стенками кристаллизатора, задаются следующие настройки решателя: во вкладке *Basic Settings → Boundary Type → Interface; Boundary Details → Mass And Momentum → Option = No Slip Wall; Wall Roughness → Option = Smooth Wall; Heat Transfer → Option → Conservative Interface Flux*.

Для поверхностей расплава домена *Groove2*, контактирующего с стенками кристаллизатора и поверхностью дугообразного сегмента, задаются следующие настройки решателя: во вкладке *Basic Settings → Boundary Type → Interface; Boundary Details → Mass And Momentum → Option = No Slip Wall; Wall Roughness → Option = Smooth Wall; Heat Transfer → Option → Conservative Interface Flux*. На вкладке *Sources* ставятся галочки *Boundary Source u Bulk Sources → Option → Use Volume Fraction; Energy Sources = Energy*; Ставится галочка в разделе *Energy, Energy → Option = Flux*. В качестве теплового потока задается полученная ранее зависимость (см. рис. 3.5), т.е. моделируется тепловыделение от сил контактного трения. Аналогичным способом задается тепловыделение от сил деформации металла в объеме домена *Groove2* в соответствии с зависимостью, представленной на рис. 3.6.

Настройка граничных и начальных условий доменов *Insulator, Matrix* и *Podstavka* (рис. 3.10) и *Solid Air* (рис.3.11) аналогична, как для домена *Corpus*.

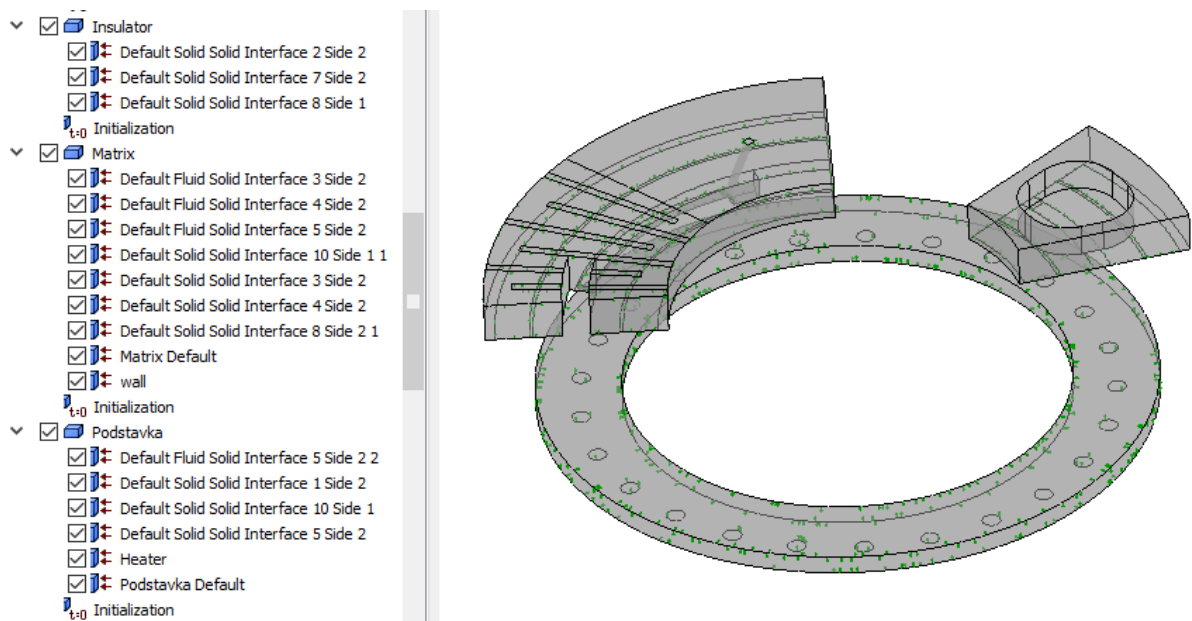


Рис. 3.10. Поверхности домена *Insulator*, *Matrix* и *Podstavka* для задания параметров решения задачи

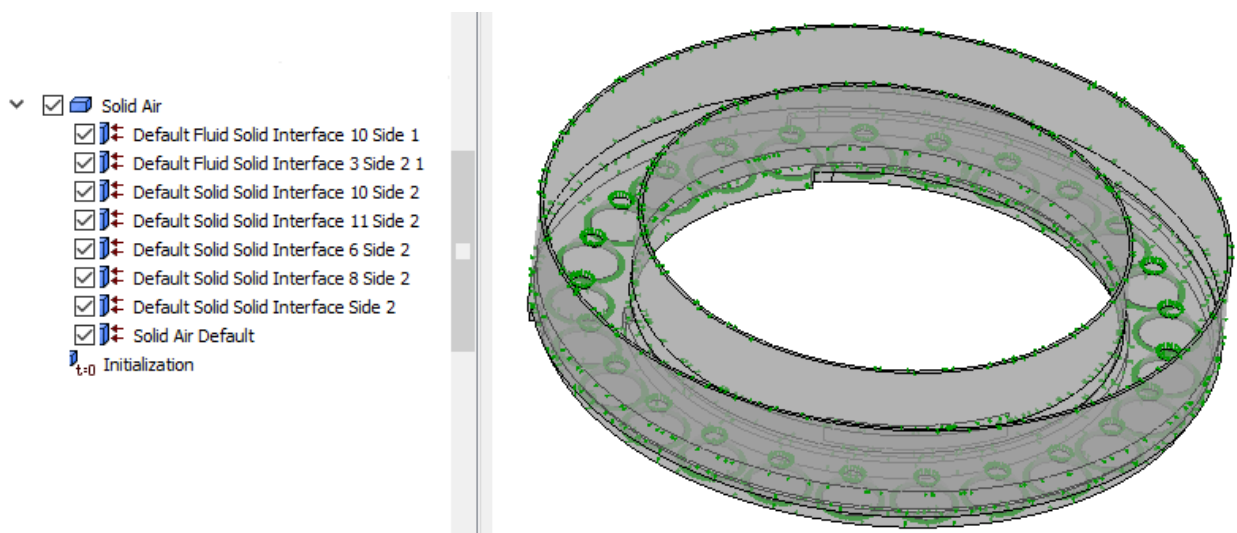


Рис. 3.11. Поверхности домена воздушной прослойки *Solid Air*

Для поверхностей, контактирующих с воздухом и другими элементами установки граничные и начальные условия задаются в соответствии с выше описанной методикой. Дополнительно для обрабатываемого сплава вводятся функции *User Functions* – теплоёмкости, теплопроводности, плотности, вязкости и поверхностного натяжения расплава.

Домены между собой связываются интерфейсами. Интерфейс домена используется для описания связующих границ между сетками, где поверхности различны или происходит изменение каркаса. Сетки

«склеиваются» вместе с помощью функции основного интерфейса сеток *General Grid Interface (GGI)* Ansys CFX.

### 3.4 Разработка компьютерной модели для проведения инженерных расчетов

На базе программного продукта Ansys CFX разработана упрощенная трехмерная математическая модель теплообмена в установке НСЛиП с ГК (рис. 3.12). В модели отсутствует дугообразный сегмент, под которым происходит процесс прессования металла, а также тигель с дозатором, через который заливается расплав, корпус и некоторые другие элементы.

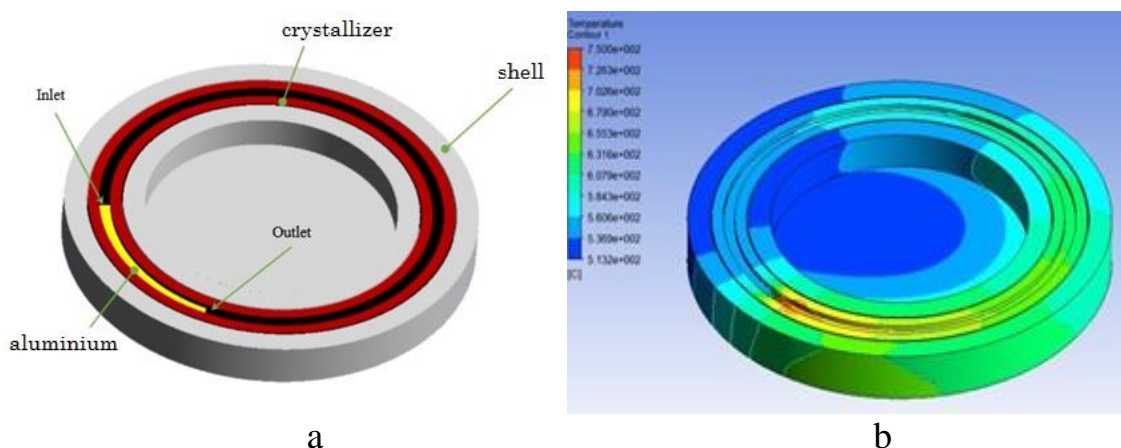


Рис. 3.12. Упрощенная модель теплообмена в установке НСЛиП с ГК:  
а – геометрия модели; б – распределение температуры в элементах модели

Модель позволяет выполнить инженерные экспресс-расчеты и определить изменение по времени температуры расплава в ручье вращающегося колеса-кристаллизатора и найти место расположения дугообразного сегмента в соответствии от заданной температуры подачи в нее заготовки. По технологическим условиям процесс обрабатываемый металл должен заходить под неподвижный часть дугообразный сегмент, имея температуру на 1-2 °С ниже солидуса сплава, что и определяет искомое его место в рабочем положении. При моделировании переноса расплава по времени граничные условия учитывают: Inlet – подачу жидкого металла;

Outlet – выход из установки затвердевшего металла с тем же массовым расходом. По условиям задачи внутри доменов «корпус» и «кристаллизатор» решается уравнение теплопроводности. Домен «металл» описывается системой уравнений Навье-Стокса для ламинарного течения несжимаемой жидкости и нестационарной теплопроводности (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614574) [143].

### 3.5. Выводы по главе 3

1. Разработана динамическая компьютерная трехмерная модель установки НСЛиП с ГК, учитывающая условия сложного теплообмена между её элементами, движение горизонтального кристаллизатора и поступающего расплава, зависимость его теплофизических характеристик от температуры, а также образование теплоты при фазовом переходе, от преодоления сил контактного трения и деформации металла.

2. Представлена методика построения сеточных областей контрольных объемов в трехмерной модели установки НСЛиП с ГК (размер сетки в итоговом расчете всей модели составил 3.7 млн. ячеек). Измельчение сетки для домена металла производилось пропорционально кривизне поверхностей, пристеночный слой размещается при помощи 10 слоев на расстоянии 2 мм от стенки с коэффициентом роста 1,2. Размер ячейки внутри доменов металла составляет 0.8 мм. В домене кристаллизатор, дугообразный сегмент и подставка задаётся сгущение сетки в месте контакта с обрабатываемым металлом. В остальных областях размер ячейки не фиксируется. Между доменами внутри расчетной области узлы стыкуются по правилу «узел-в-узел».

3. Нелинейное трехмерное уравнение сохранения энергии записывалось в виде субстанциональной производной, которое дополняется краевыми условиями радиационно-конвективного теплообмена на границах контакта с воздухом. При рассмотрении домена металл, уравнение учитывает

скрытую теплоту затвердевания, включенную в величину эффективной теплоёмкости. Для повышения точности решаемой задачи вводится величина эффективного коэффициента теплопроводности. Тепловыделение от сил контактного трения и сил деформации обрабатываемого металла учитывалось в модели путем добавления объемного источника теплоты в зоне прессования.

4. Разработана упрощенная трехмерная математическая модель теплообмена в установке НСЛиП с ГК и программа инженерного расчета на ЭВМ температуры кристаллизующегося расплава цветных металлов в ручье колеса-кристаллизатора установки Конформ-Кастэкс. Модель позволяет выполнять инженерные экспресс-расчеты угла затвердевания расплава в зависимости от времени ее работы, а также динамику температуры обрабатываемого расплава в сечении канавки колеса-кристаллизатора.



## **ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ЛИТЬЕ И ПРЕССОВАНИИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Одним из эффективных методов производства алюминиевой проволоки является совмещенный в одной установке процесс непрерывного литья и прессования. Однако до настоящего времени не создано промышленных образцов, которые бы надежно эксплуатировались на рынке производства прессовой продукции в виде длинномерных профилей относительно небольшого поперечного сечения из цветных металлов и сплавов. Связано это с тем, что начальный период работы после пуска установки (переходный тепловой режим) характеризуется нестационарным тепловым состоянием ее элементов [32, 33]. При выходе же на стационарный (регулярный) режим существенное влияние на температурно-временные условия затвердевания металла (динамику теплообмена) оказывает ряд внешних факторов: флуктуации начальной температуры поступающего расплава и элементов установки, скорость вращения кристаллизатора и др. [34, 35, 131-133].

В данной главе приведены результаты исследования нестационарного теплообмена в установке НСЛиП с ГК при обработке алюминиевых сплавов. При этом основная цель компьютерного моделирования заключалась в развитии теории тепловой работы установок данной конструкции, что позволило бы найти научно обоснованное инженерное решение, направленное на повышение их эксплуатационной надежности и длительности компании.

### **4.1. Анализ динамики теплообмена при литье-прессовании алюминиевых сплавов в переходном режиме работы установки**

Для оценки параметров переходного процесса и детального анализа возможности непрерывного литья-прессования была построена

компьютерная модель (главе 3) и решена задача затвердевания расплава с учетом теплового взаимодействия между элементами установки. При этом расчет температурных зависимостей в переходной области твердо-жидкого состояния производился в соответствие с теорией квазиравновесной двухфазной зоны [111], широко применяемой при анализе тепловых режимов затвердевания промышленных расплавов. Цель расчета заключалась в определении местоположения затвердевшего сплава, в сечении которого температура не превышает  $t_s$  обрабатываемого металла, которое зависит от времени работы установки.

Сравнительный анализ динамики теплообмена в переходном режиме работы установки проведен в трех расчетных сечениях затвердевающего металла и кристаллизатора, образованных вертикальной секущей плоскостью и расположенных на удалении от точки заливки расплава  $P$  под углами  $\varphi_1 = 30^\circ$ ,  $\varphi_2 = 120^\circ$  и  $\varphi_3 = 210^\circ$  (рис. 4.1).

Как видно, центральные углы  $\varphi_i$  дуги окружности канавки кристаллизатора радиусом  $R_k = 0,35$  м расположены между полярной осью  $OP$  (отрезок  $OP = R_k$ ) и лучами, соединяющими полюс  $O$  с расчетными сечениями. Отсчет  $\varphi_i$  принят в направлении по часовой стрелке, а сечение  $\varphi_3$ , расположенное на угловом расстоянии  $\Delta\varphi = 15^\circ$  от неподвижного дугообразного сегмента, рассматривается как контрольное. На этом дуговом отрезке от точки  $P$  ( $0,41\pi$ , м), в соответствие с технологическими условиями горячего прессования, должен быть обеспечен оптимальный диапазон максимальной температуры по сечению затвердевающего алюминиевого расплава  $t_{зп}^{\max}$ , значение которого на  $3-5^\circ\text{C}$  ниже  $t_s$  позволяет получить на выходе из матрицы пресс-изделие с температурой  $t_{зп}^{\max} \leq 0,9t_s$ .

При моделировании учтено, что в процессе работы установки жидкий металл 3 заливается через дозатор 4 в кольцевую канавку 2 вращающегося колеса-кристаллизатора 1 и затвердевает до входа в камеру прессования, образованную на участке сопряжения канавки с дугообразным сегментом 5.

Затвердевший металл, поступая в камеру прессования, выдавливается в отверстие матрицы *б* в виде пресс-изделия (см. рис. 4.1). Процессы заливки жидкого металла в канавку, его затвердевание и прессование протекают непрерывно.

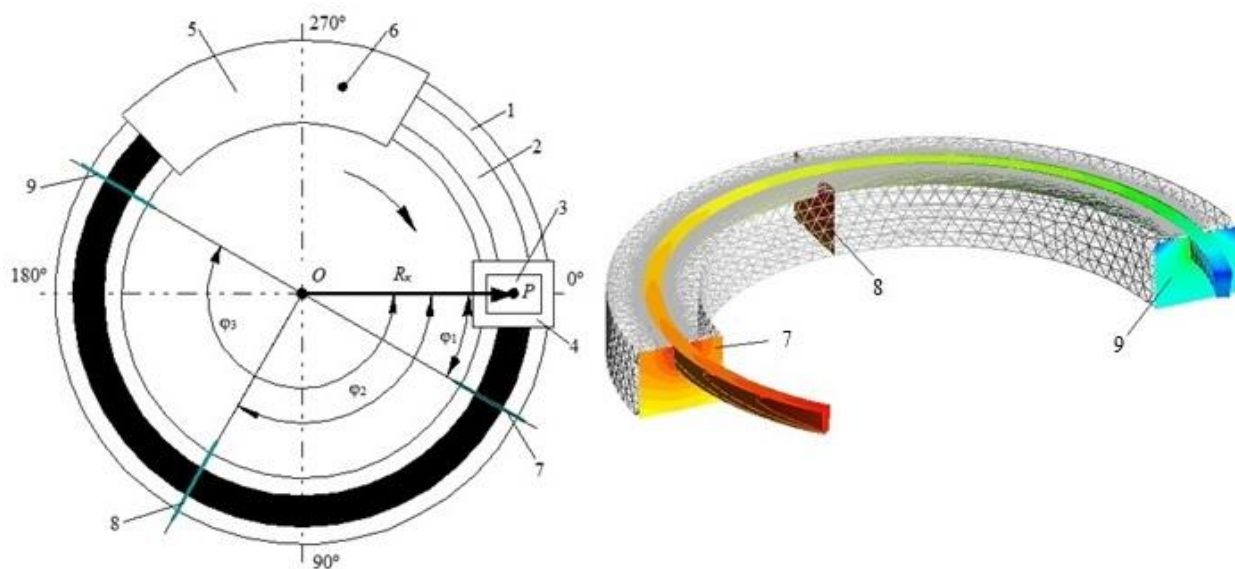


Рис. 4.1. Схема установки непрерывного совмещенного литья и прессования с горизонтальным карусельным кристаллизатором:  
 1 – колесо-кристаллизатор; 2 – кольцевая канавка радиусом  $R_k$ ;  
 3 – жидкий металл; 4 – дозатор; 5 – дугообразный сегмент; 6 – матрица;  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  – центральные углы дуги между точкой заливки расплава *P* и расчетными сечениями 7, 8 и 9

На рис. 4.2 представлены результаты расчета при обработке сплавов АК12; АД31 и АД0. Температура заливки для всех исследуемых расплавов  $t_p$  составляет 750 °С.

Анализ показывает, что кривая затвердевания сплава АК12 находится выше кривых затвердевания остальных исследуемых сплавов. Связано это с тем, что точка солидуса сплава АК12 существенно ниже относительно других исследуемых сплавов, поэтому по мере прогрева, сплав достигает температуры фазового перехода раньше.

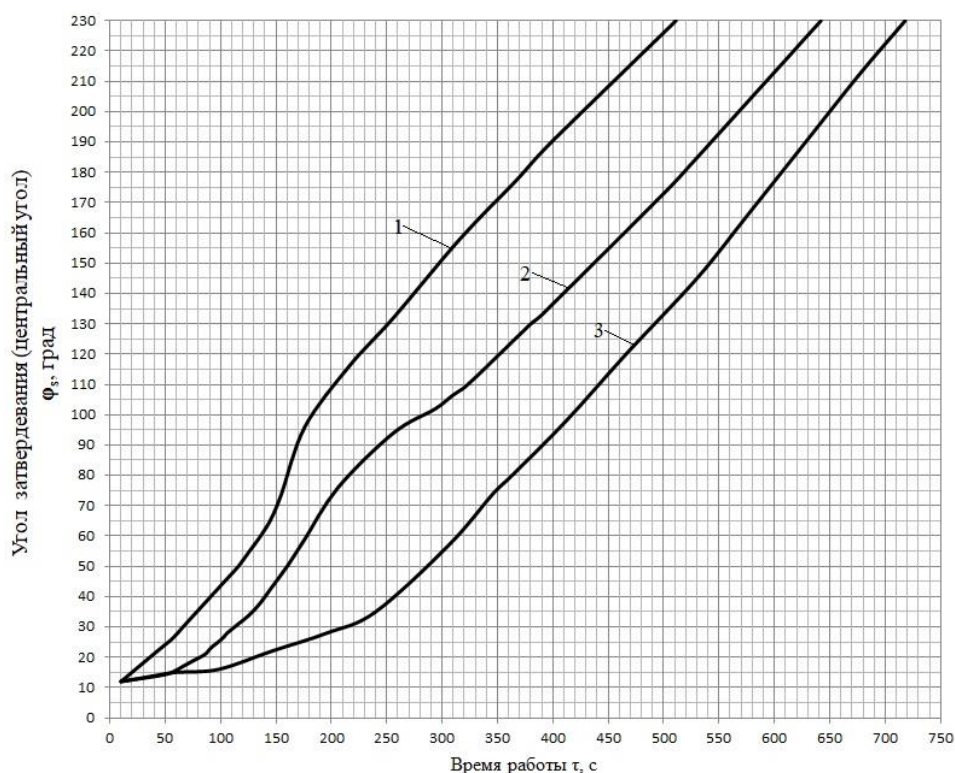


Рис 4.2. Изменение угла затвердевания расплава  $\varphi_s$  в переходном тепловом режиме работы установки:  
 1 – сплав АК12; 2 – сплав АД31; 3 – сплав АД0

Хорошо видно, что сплавы имеют схожий характер изменения угла затвердевания. Кривые затвердевания 2 и 3 имеют более длительный временной промежуток до момента попадания жидкой фазы обрабатываемого металла под дугообразный сегмент. Сплавы АД31 и АД0 (кривая 2, 3) имеют длительный фазовый переход от температуры «ликвидуса» до температуры «солидуса» относительно сплава АК12 (кривая 1), фазовый переход которого протекает при одной температуре 580 °С. В результате чего при кристаллизации выделяется большее количество теплоты. Главным образом на изменение длины дуги затвердевания сплавов влияет два режимных параметра: температура заливаемого расплава и температура кристаллизатора, которая изменяется в переходном тепловом процессе работы установки.

На рис. 4.3 представлены расчетные температурные поля кристаллизатора, позволяющие судить об изменении длины дуги

затвердевания расплава в зависимости от времени работы установки. На рисунке жёлтым маркером обозначено место в канавке кристаллизатора, где максимальный уровень температуры по сечению металла не превышает температуру солидуса сплава АК12, что соответствует технологическим условиям его дальнейшего прессования.

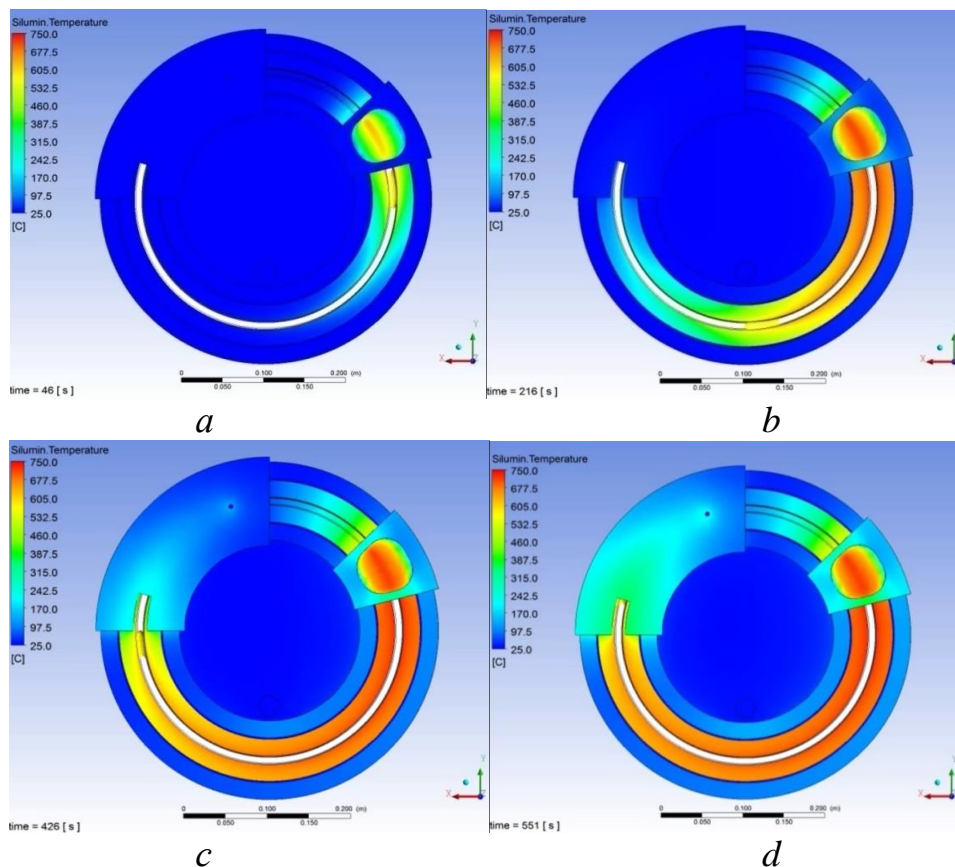


Рис. 4.3. Изменение длины дуги затвердевания расплава АК12 в зависимости от времени работы установки:  
 а – 46 с; б – 216 с; в – 426 с; д – 551 с

Для оценки адекватности результатов компьютерного моделирования проведено их сравнение с полученными ранее экспериментальными данными. На рис. 4.3 результаты экспериментов и расчета обобщены в виде графика зависимости угла затвердевания расплава  $\varphi_s$  от времени работы установки в переходном тепловом режиме.

Сравнительный анализ показывает, что результаты, полученные при численном исследовании сложного теплообмена в установке НСЛиП с ГК, хорошо согласуются с экспериментальными данными [101], подтверждают

адекватность компьютерной модели и возможность отработки на ней инженерных решений.

Так, например, при моделировании литья-прессования опытного сплава АК12 угол затвердевания расплава  $\varphi_s$  спустя 75, 155 и 170 с от начала работы установки составил соответственно 37°, 74° и 91°. При проведении эксперимента в том же временном интервале этот угол составил соответственно 33°, 57° и 68° (рис. 4.4).

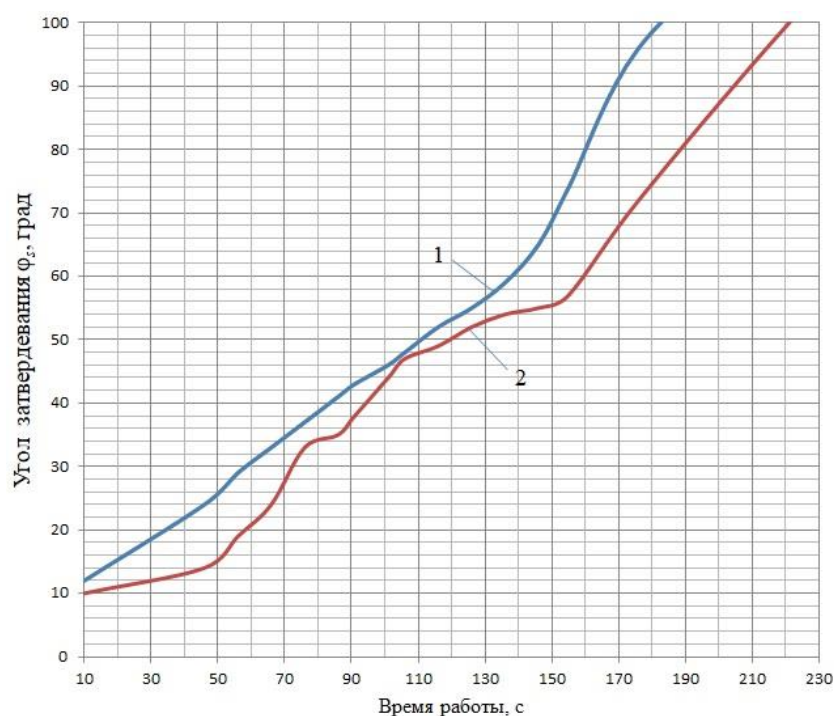


Рис. 4.4. Динамика изменения угла затвердевания  $\varphi_s$  расплава АК12:  
1 – расчет; 2 – эксперимент

Расхождения в изменении угла затвердевания  $\varphi_s$  между экспериментом и расчётом главным образом связаны с тем, что при моделировании температура солидуса определялась во всем сечении затвердевающего металла, а не локально при измерении температуры термопарой в ходе эксперимента. Кроме того, следует учитывать погрешность измерительного прибора и определённую тепловую инерционность защитного кожуха хромель-алюмелевой термопары.

Отметим, что анализ результатов изменения температуры дугообразного сегмента затруднен в связи с ограничением времени

проведения эксперимента. Тем не менее, экспериментальные данные, представленные ранее (см. рис. 2.10) имеют схожий характер изменения температуры, что и при расчете на компьютерной модели. Температура в измеряемых точках по истечению  $\tau = 240$  с не превышают 77 и 49 °С (кривые 2 и 5, рис. 2.10). Аналогичные кривые имеют температуру 55 и 30 °С (кривые 1 и 5, рис. 4.4) соответственно.

При численном исследовании темп изменения температуры пресс-изделия до третьей минуты составляет 0,07 °С/с, а в дальнейшем до седьмой минуты – 0,48 °С/с, что также согласуется с экспериментом. При дальнейшей работе установки темп изменения температуры увеличивается до тринадцатой минуты, после чего замедляется и выходит на стационарный тепловой режим.

Расхождения результатов измерений и расчетов связаны, в первую очередь, с расположением датчиков температуры в теле дугообразного сегмента при проведении эксперимента. При подготовке отверстий под датчики температуры их расположение, вероятнее всего, оказалось ближе к зоне прессования.

Достоверность представленных материалов подтверждается актом опытно-промышленной апробации результатов исследования (Приложение Б).

Анализ динамики процесса непрерывного литья и прессования сплава АК12 в переходном тепловом режиме работы установки показал, что температуры дугообразного сегмента и обрабатываемого сплава на выходе из матрицы достаточно близки (рис. 4.5). Поэтому осуществлять отбор излишней теплоты для стабилизации температурных условий в установке необходимо от дугообразного сегмента в зоне расположения датчиков температуры  $T1$ ,  $T2$  и  $T4$  (см. рис. 2.1, а).

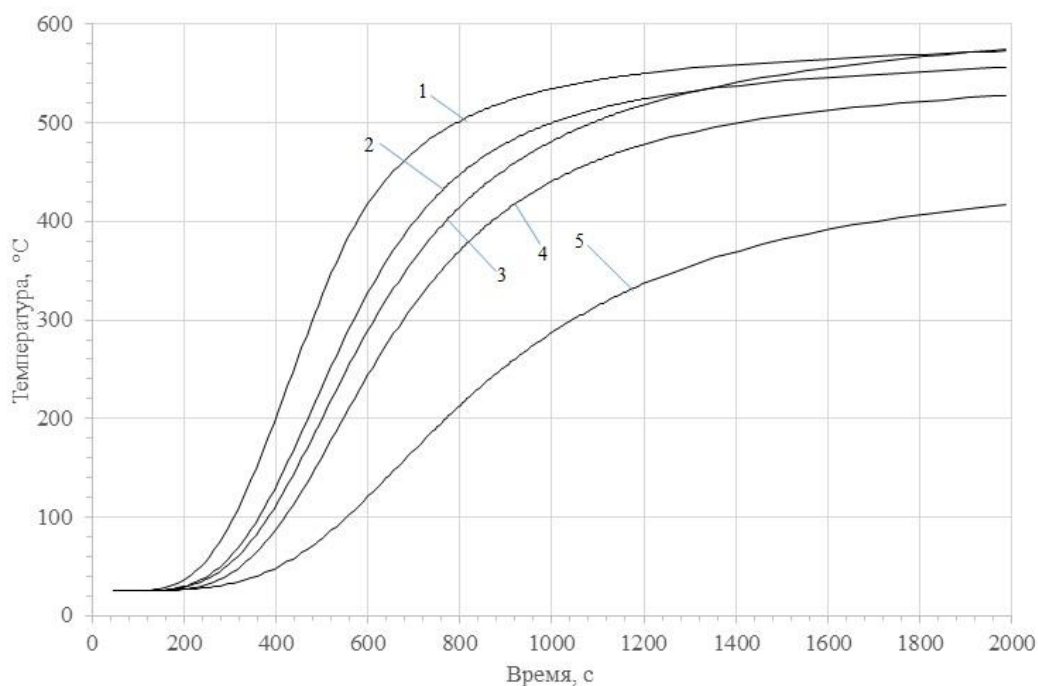


Рис. 4.5. Изменение температуры дугообразного сегмента и обрабатываемого расплава на выходе из матрицы в переходном тепловом режиме работы установки для сплава АК12:

1, 2, 4 и 5 – температура в теле дугообразного сегмента соответственно в датчиках  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  и  $T_4$ ; 3 – температура обрабатываемого расплава на выходе из матрицы

На основе проведенных ранее экспериментов (глава 2) и результатов расчетного анализа конструкцию установки условно можно разделить на пять теплотехнических зон, характеризующихся различной степенью теплообмена в период от холодного пуска до момента стабилизации температуры всех ее элементов: внешнего подвода теплоты; затвердевания металла; прессования металла; конвективного теплообмена кристаллизатора с окружающей средой; контакта движущегося кристаллизатора с подшипниками.

Первая зона внешнего подвода теплоты. В этой зоне теплота подводится за счет заливки перегретого расплава из дозатора в кристаллизатор, а также от предварительно разогретых дозатора и его подставки (для обеспечения работоспособности установки в нестационарном режиме ее работы при низком перегреве расплава).



Вторая зона затвердевания соответствует участку от места заливки расплава до дугообразного сегмента с углом между ними  $\varphi = 230^\circ$ . В этой зоне выделяется скрытая теплота кристаллизации металла.

Третья зона прессования металла соответствует участку от места входа обрабатываемого сплава под дугообразный сегмент до упора. В этой зоне изменение температуры обрабатываемого металла происходит за счет объемных источников тепловыделения – контактного трения о стенки кристаллизатора и дугообразный сегмент, а также деформации обрабатываемого металла. При этом одна часть образовавшейся теплоты отводится кристаллизатором через дугообразный сегмент, другая – поглощается обрабатываемым слитком.

Четвертая зона конвективного теплообмена кристаллизатора с окружающей средой располагается в области от дугообразного сегмента до места заливки расплава.

Пятая зона теплового взаимодействия, располагается между горизонтальным кристаллизатором и подшипниками корпуса установки.

Установлено, что при выходе установки на стационарный тепловой режим имеет место постоянное возрастание энтальпии металла в первой – третьей теплотехнических зонах с каждым оборотом кристаллизатора. Поэтому при естественном охлаждении элементов установки имеется большая вероятность того, что сплав превысит температуру солидуса перед зоной прессования или в этой теплотехнической зоне. В последнем случае произойдет фазовый переход сплава из твердого в жидкое состояние [101].

#### **4.2. Исследование теплообмена при различной температуре разлива**

В математической модели опытный эвтектический расплав АК12 заливался в кристаллизатор через дозатор с диаметром выходного сечения 1,8 мм, установленный на зафиксированной относительно корпуса подставке. Массовый расход расплава составлял 9 г/с при температуре его заливки  $t_p$ ,

изменяющейся в диапазоне 635–750 °С. Таким образом, для принятого значения точки солидуса этого эвтектического сплава  $t_s = 580$  °С диапазон температуры перегрева расплава  $\Delta t_p$  составил 55–170 °С. Выход затвердевшего алюминия в модели соответствовал его расходу, направление вращения кристаллизатора принималось по часовой стрелке, температура окружающей среды – 20 °С. Физические характеристики сплава АК12 приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Физические свойства опытного сплава АК12[129]

Температура, °С	27	127	327	580	727
Плотность $\rho$ , (кг/м <sup>3</sup> )	838	855	941	1090	1177
Температура, °С	27	200	400	580	590
Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , (Вт/м К)	160	170	180	170	90
Температура, °С	27	660	700	750	800
Удельная теплоемкость $c$ , (Дж/кг К)	2650	2368	2357	2345	2332

В расчетах принята упрощенная геометрия модели: фаски на кристаллизаторе и металле не учитывались (при условии сохранения площади поперечного сечения слитка); отсутствовали крепежные соединения.

Пользуясь схемой установки (см. рис 4.1) и результатами расчётного исследования (см. рис. 4.2) можно оценить длину дуги затвердевания расплава, воспользовавшись следующим соотношением:

$$L_3 = \frac{\pi \cdot R_k \cdot \varphi_s}{180}, \quad (4.1)$$

где  $L_3$  – длина дуги затвердевания расплава, м;  $R_k$  – радиус окружности канавки колеса кристаллизатора, м;  $\varphi_s$  – угол затвердевания расплава (центральный угол), град.

По мере прогрева кристаллизатора длина дуги затвердевания металла возрастает. Так, при температуре заливки расплава АК12  $t_p = 750^\circ\text{C}$  темп изменения длины дуги затвердевания составляет 0,16 м в минуту.

Ниже представлены некоторые расчетные температурные поля по сечению затвердевающего сплава АК12 на различном удалении от места заливки, полученные в начальном периоде переходного теплового режима при  $t_p = 635^\circ\text{C}$  ( $\Delta t_p = 55^\circ\text{C}$ ),  $t_p = 690^\circ\text{C}$  ( $\Delta t_p = 110^\circ\text{C}$ ) и  $t_p = 750^\circ\text{C}$  ( $\Delta t_p = 170^\circ\text{C}$ ), (рис. 4.6–4.8).

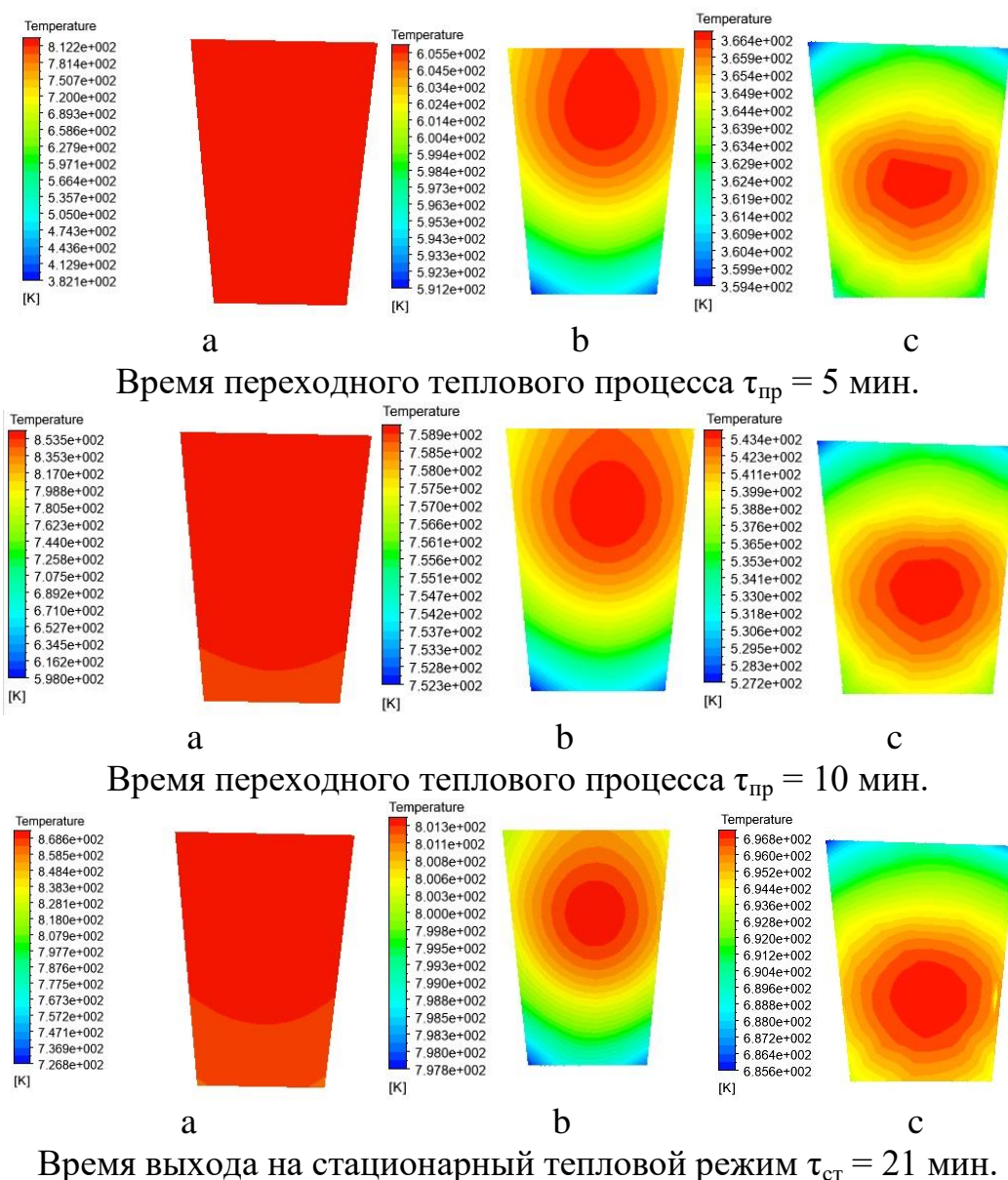
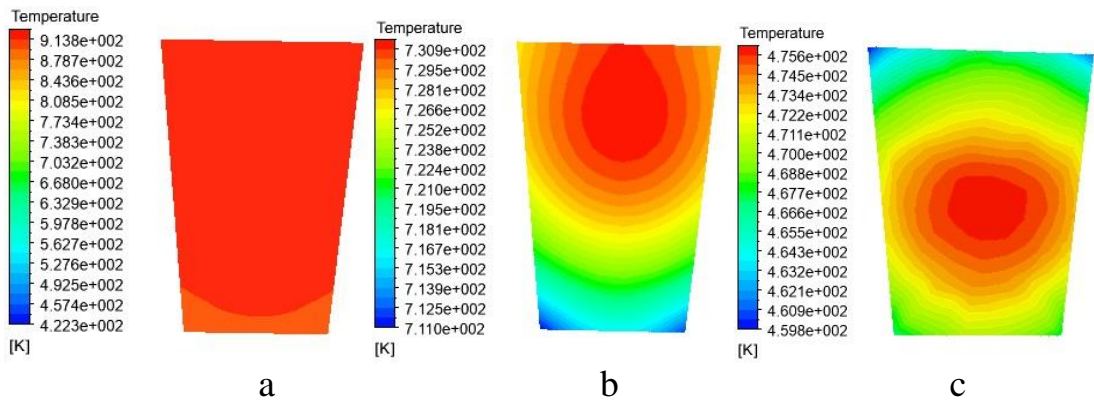
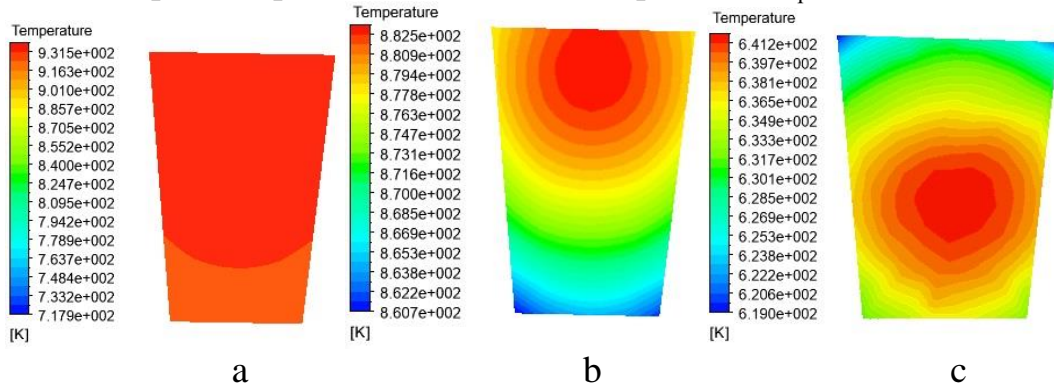


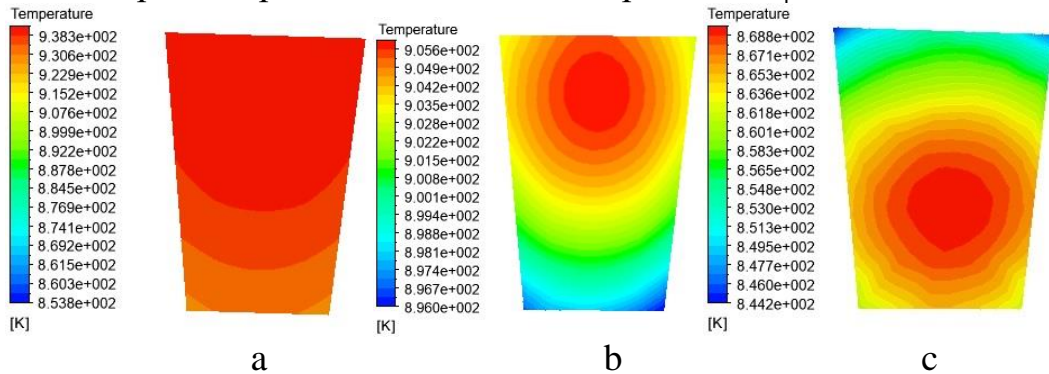
Рис. 4.6. Температурное поле в сечениях металла на удалении от места заливки расплава  $\phi$  ( $t_p = 635^\circ\text{C}$ ):  
 а –  $\phi_1 = 30^\circ$ ; б –  $\phi_2 = 120^\circ$  с –  $\phi_3 = 210^\circ$



Время переходного теплового процесса  $\tau_{пр} = 5$  мин.

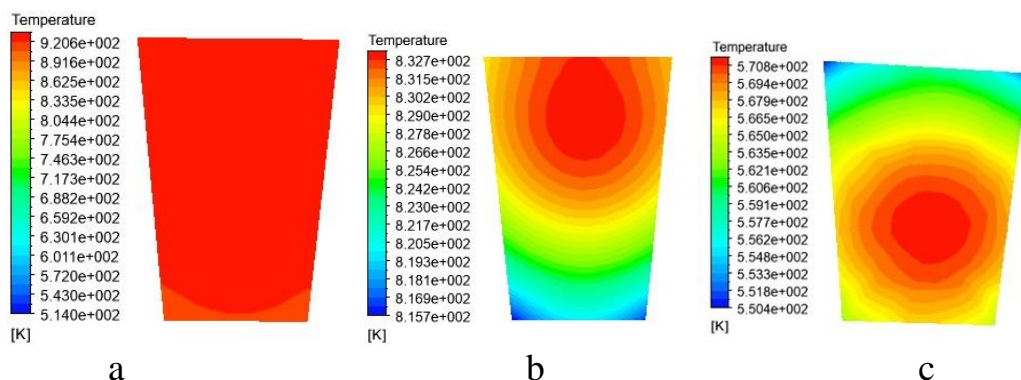


Время переходного теплового процесса  $\tau_{пр} = 10$  мин.

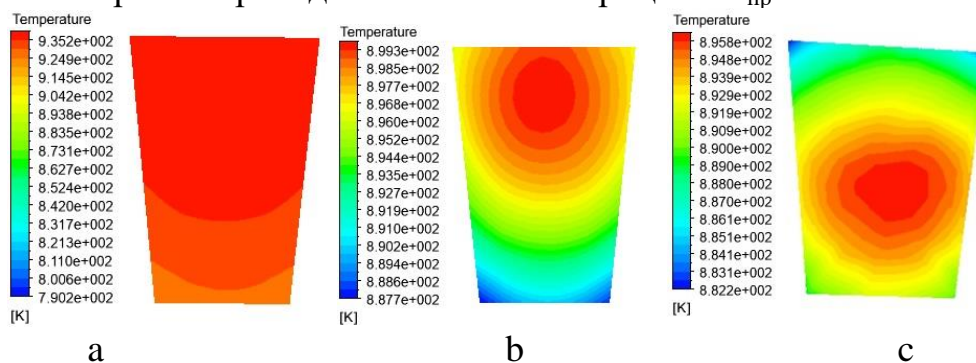


Время выхода на стационарный тепловой режим  $\tau_{ст} = 24$  мин.

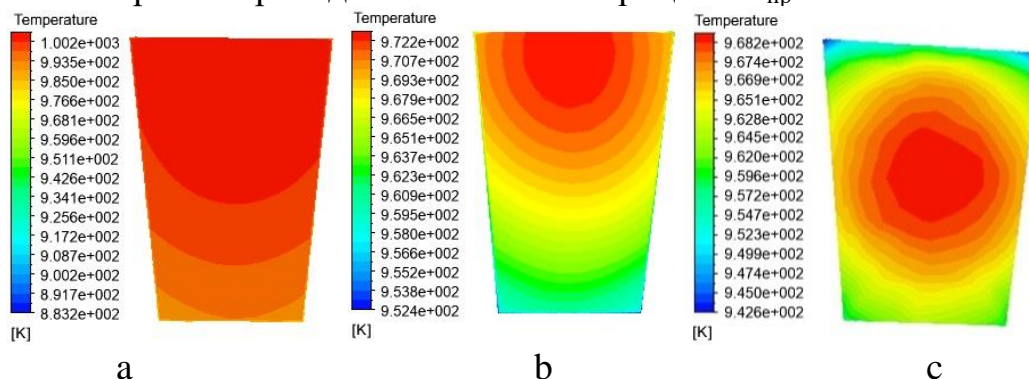
Рис. 4.7. Температурное поле в сечениях металла на удалении от места заливки расплава  $\varphi$  ( $t_p = 690$  °C):  
 а –  $\varphi_1 = 30^\circ$ ; б –  $\varphi_2 = 120^\circ$  в –  $\varphi_3 = 210^\circ$



Время переходного теплового процесса  $\tau_{пр} = 5$  мин.



Время выхода на стационарный тепловой режим  $\tau_{ст} = 10$  мин.



Время выхода на стационарный тепловой режим  $\tau_{ст} = 31$  мин.

Рис. 4.8. Температурное поле в сечениях металла на удалении от места заливки расплава  $\varphi$  ( $t_p = 750$  °С):  
 а –  $\varphi_1 = 30^\circ$ ; б –  $\varphi_2 = 120^\circ$  с –  $\varphi_3 = 210^\circ$

Распределение температуры в разных временных диапазонах в сечениях обрабатываемого сплава при температуре разливки:  $t_p = 635$  °С,  $t_p = 690$  °С,  $t_p = 750$  °С представлено в Приложении В (рис. В.1–В.30).

Как видно, в начальный момент после заливки расплава его минимальная температура со значением ниже точки солидуса  $t_s$  имеет место во втором и третьем сечении в области, соприкасающейся с холодной поверхностью колеса-кристаллизатора и окружающей средой. Установлено

существенное влияние на характер затвердевания расплава постепенного разогрева кристаллизатора в период переходного теплового режима  $\tau_{пр}$ . Так, независимо от принятой в расчетах величины  $t_p$ , в начальный момент после заливки расплава температурное поле в сечении  $\varphi_1$  носит симметричный характер, а минимальная температура  $t_p^{\min}$  не превышает величину  $t_s$ . По мере разогрева кристаллизатора в переходном процессе возрастает несимметричность температурного поля по сечению металла со сдвигом области с максимальной температурой  $t_p^{\max}$  к его поверхностным слоям, что наиболее заметно проявляется вблизи камеры прессования (см. рис. 4.6, с; рис. 4.7, с; рис. 4.8, с). Как видно, в расчетном и контрольном сечениях  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  на всем протяжении  $\tau_{пр}$  имеет место сдвиг  $t_p^{\min}$ : в сечении  $\varphi_2$  в сторону поверхностного слоя, контактирующего с окружающей средой; в контрольном сечении  $\varphi_3$  – в сторону поверхностного слоя, контактирующего с телом кристаллизатора. В последнем случае играет роль более интенсивный теплообмен между затвердевающим расплавом и телом кристаллизатора. Отметим, что при достижении времени, соответствующему стационарному тепловому состоянию установки  $\tau_{ст}$  наблюдается некоторое выравнивание температурного поля в результате перемещения  $t_p^{\max}$  к центру сечения. Так, например, на 10-й минуте переходного теплового процесса ( $\tau_{пр}$ ) в сечении  $\varphi_3 = 210^\circ$  хорошо прослеживается сдвиг к поверхности кристаллизатора максимальной температуры расплава  $t_p^{\max}$ , и уменьшение перепада температур в сечениях затвердевающего расплава.

Анализируя полученные эпюры распределения температур при разливке расплава с  $t_p = 635^\circ\text{C}$  (см. рис. 4.6), можно проследить темп изменения температуры в рассматриваемых сечениях. Так в первом контрольном сечении  $\varphi_1$  от момента заливки расплава скорость изменения температуры составляет  $0,51^\circ\text{C}/\text{с}$ . По истечению пяти минут темп снижается и составляет  $0,14^\circ\text{C}/\text{с}$ . На 13 минуте работы установка практически выходит

на стационарный тепловой режим работы. Во втором контрольном сечении  $\varphi_2$  темп изменения температуры в начальный период работы составляет 0,16 °C/с. В дальнейшем, после пяти минут работы установки из-за прогрева кристаллизатора скорость изменения температуры возрастает до 0,51 °C/с, по истечению 13 минут работы темп снижается до 0,03 °C/с. Важно отметить, что в данном рассматриваемом сечении область с максимальной температурой расплава  $t_p^{\max}$  изменяет свою форму, размер и геометрическое место положение, что хорошо видно на (рис. 4.6, b). В начальный момент работы установки, в расчетном сечении  $\varphi_2$ , за счёт контакта расплава с относительно холодным кристаллизатором затвердевание происходит в первую очередь около его стенок. Данная особенность также отмечается авторами работ [54, 65, 67 и др.]. Область с максимальной температурой расплава  $t_p^{\max}$  в данном сечении растянуто, располагается в верхней его части и имеет форму капли. Форма капли обусловлена тем, что теплообмен с поверхности расплава за счет конвекции и излучения в центре зеркала затвердевающего металла протекает медленнее, чем в верхних углах сечения. Данная ситуация, объясняется дополнительным отбором тепла стенками кристаллизатора от расплава. Рассматривая третье контрольное сечение  $\varphi_3$ , в аналогичных временных рамках темп изменения температуры составляет соответственно 0,43; 0,59 и 0,11 °C/с.

При анализе распределения температур в контрольных сечениях при разливке  $t_p = 635, 690$  и  $750$  °C отмечено, что характер изменения температуры в них подобен. Однако при  $t_p = 690$  и  $750$  °C металл попадает в зону прессования уже в жидкой фазе.

Область с максимальной температурой  $t_p^{\max}$  во втором и третьем расчетных сечениях ( $\varphi_2$  и  $\varphi_3$ ) смещается от поверхности контакта с воздухом в сторону центра, а затем по мере прогрева кристаллизатора – к поверхности зеркала расплава (см. рис. 4.7 и 4.8). При этом в конце переходного периода  $t_p^{\max}$  смещается в центральную область сечения.

Расчеты свидетельствуют о высокой продолжительности переходного процесса при пуске установки из холодного состояния до достижения ею стационарного теплового режима  $\tau_{ст}$ , которая зависит от темпа разогрева кристаллизатора и температуры заливаемого расплава. На (рис. 4.9 – 4.11) для трех контрольных сечений показаны графики, позволяющие судить об изменении длины дуги затвердевания расплава в зависимости от времени протекания переходного теплового процесса и температуры заливаемого расплава.

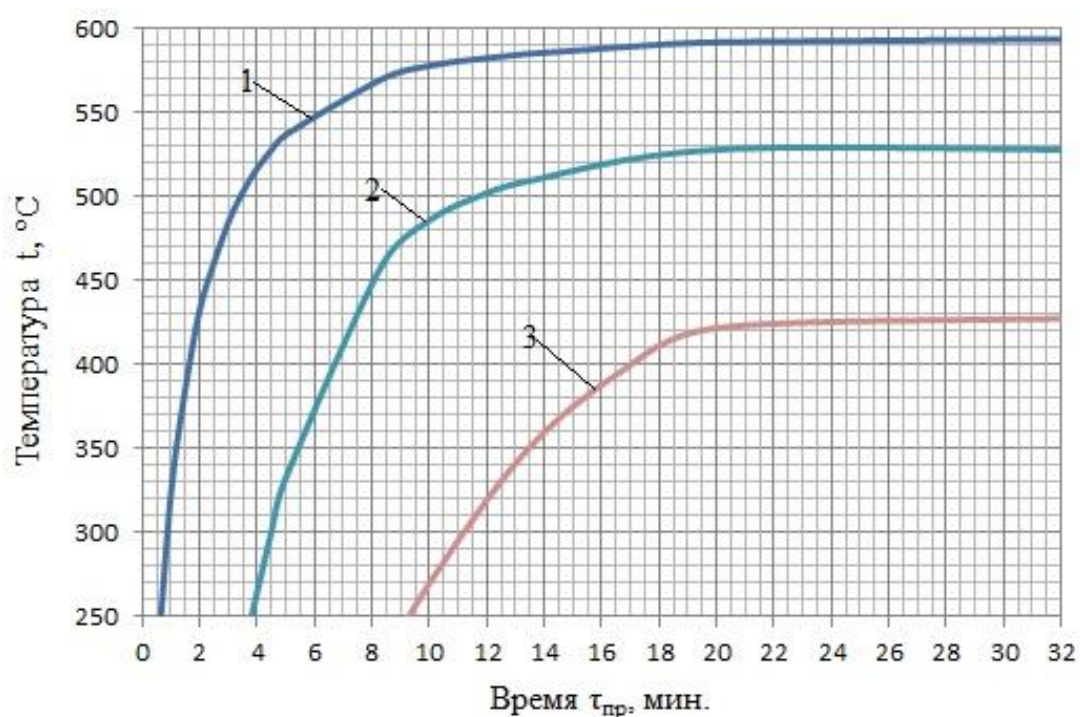


Рис. 4.9. Изменение максимальной температуры  $t_p^{\max}$  сплава АК12 при  $t_p = 635$  °C ( $\Delta t_p = 55$  °C) в расчётных сечениях  $\phi_i$ :  
 1 –  $\phi = 30^\circ$ ; 2 –  $\phi = 120^\circ$ ; 3 –  $\phi = 210^\circ$



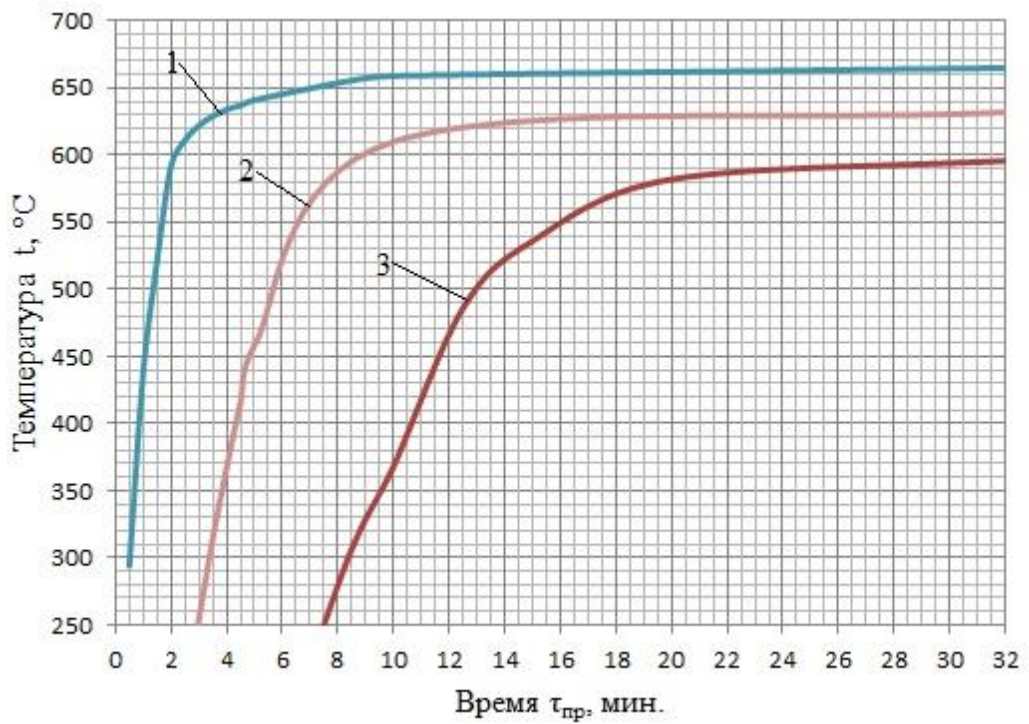


Рис. 4.10. Изменение максимальной температуры  $t_p^{\max}$  сплава АК12 при  $t_p = 690^\circ\text{C}$  ( $\Delta t_p = 110^\circ\text{C}$ ) в расчётных сечениях  $\phi_i$ :  
 1 –  $\phi = 30^\circ$ ; 2 –  $\phi = 120^\circ$ ; 3 –  $\phi = 210^\circ$

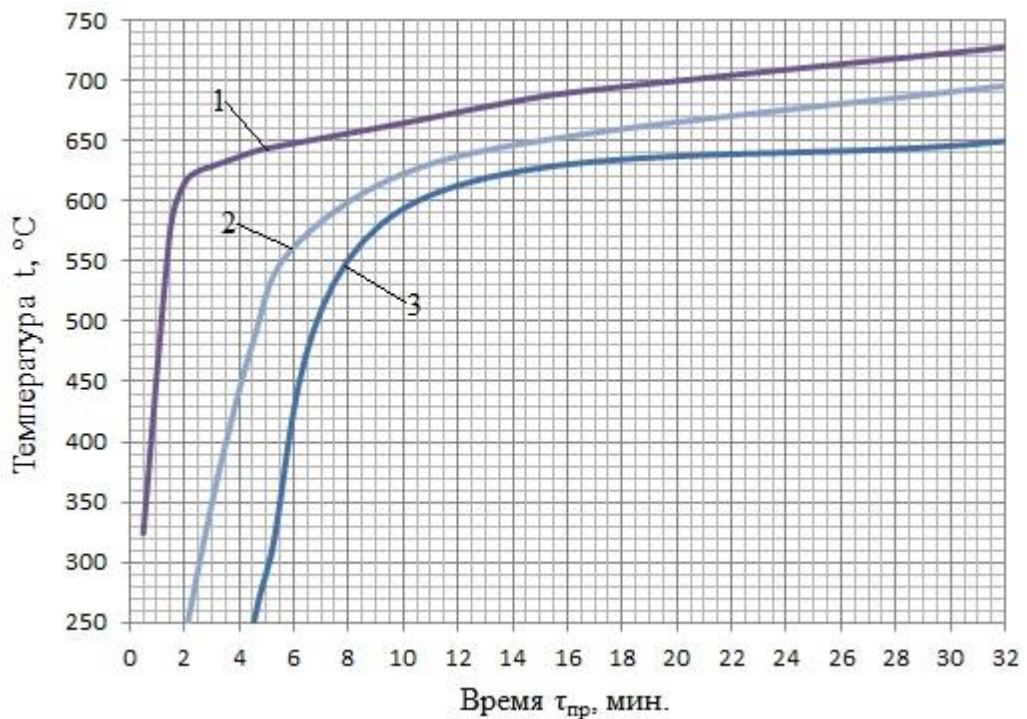


Рис. 4.11. Изменение максимальной температуры  $t_p^{\max}$  сплава АК12 при  $t_p = 750^\circ\text{C}$  ( $\Delta t_p = 170^\circ\text{C}$ ) в расчётных сечениях  $\phi_i$ :  
 1 –  $\phi = 30^\circ$ ; 2 –  $\phi = 120^\circ$ ; 3 –  $\phi = 210^\circ$

Из приведенных на рис. 4.9 графиков следует, что температура заливаемого расплава оказывает заметное влияние на величину  $\tau_{ст}$ , которая при увеличении  $t_p$  от 635 до 750 °С (на 115 °С) возрастает примерно на десять минут. Так, при температуре заливаемого расплава  $t_3 = 635, 690$  и  $750$  °С время выхода на стационарный тепловой режим  $\tau_{ст}$  составляет соответственно 21, 24 и 31 мин. Согласно расчетам, при  $t_p = 635$  °С ( $\Delta t_p = 55$  °С) на всем протяжении переходного теплового процесса обрабатываемый сплав попадает под дугообразный сегмент с температурой не превышающей величину  $t_s$  во всех расчетных сечениях (см. рис. 4.6), что говорит о возможности использования установки НСЛиП с ГК без организации принудительного охлаждения. Однако при  $t_p$  690 и 750 °С на всем протяжении переходного процесса до достижения времени, соответствующему  $\tau_{ст}$  величина  $t_p^{max}$  затвердевающего расплава во всех расчетных сечениях превышает  $t_s$  и он попадает в зону прессования в жидкой фазе, что недопустимо по технологическим условиям его обработки. Так, например, при  $t_p = 750$  °С по истечению  $\tau_{пр} = 9$  минут работы установки (18 оборотов кристаллизатора)  $t_p^{max}$  расплава в контрольном сечении  $\phi_3$  превышает величину  $t_s$ , т.е. металл попадает в зону прессования еще в жидкой фазе (см. рис. 4.9 кривая 3).

Во всех рассмотренных случаях температура металла плавно растёт от момента пуска установки до определённого момента, после чего происходит незначительное ее увеличение во всех сечениях до выхода установки на стационарный тепловой режим. Установлен максимальный предел величины  $\Delta T_s^{max}$ , выше которой при реализации технологии непрерывного совмещенного литья и прессования расплав не затвердевает в кристаллизаторе. Так, согласно расчетам, значение  $\Delta T_s^{max}$  составляет 90–95 °С ( $t_p = 670–675$ °С). В ходе исследования была получена зависимость, позволяющая определить, время выхода установки НСЛиП с ГК на

стационарный тепловой режим при изменении температуры перегрева заливаемого расплава (рис. 4.12).

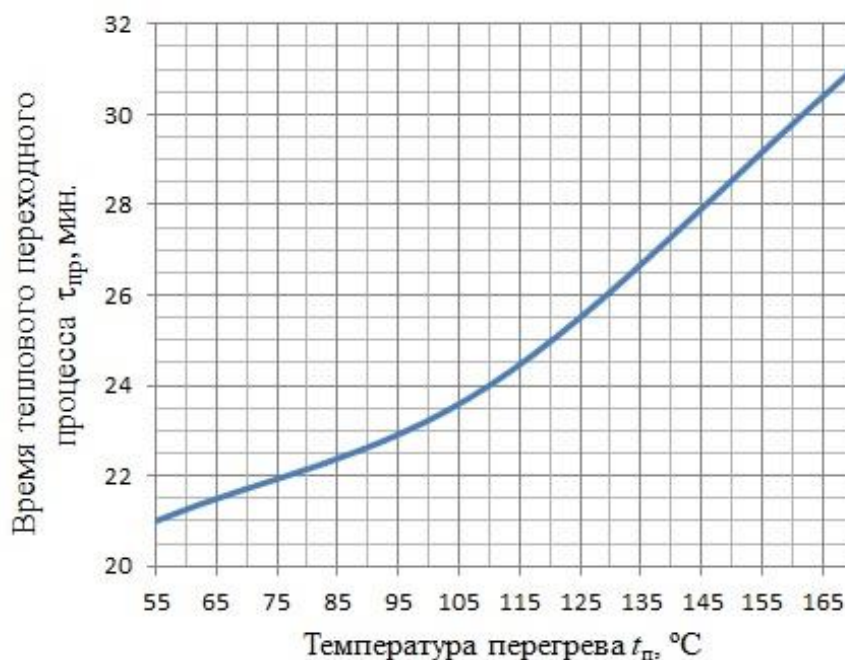
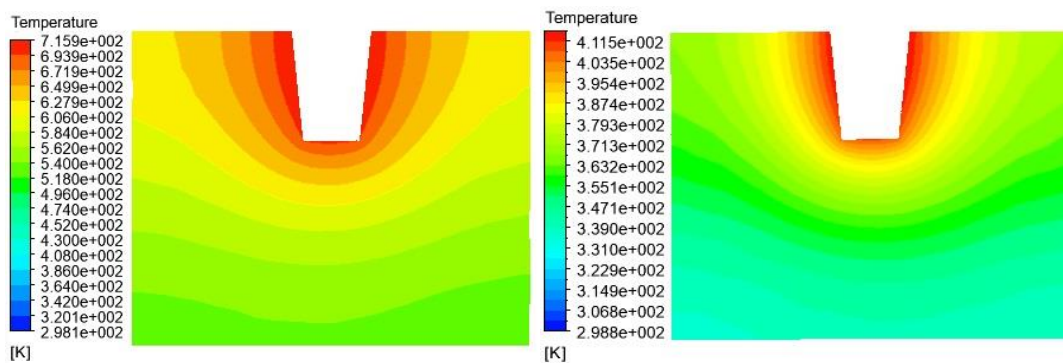


Рис. 4.12. График для определения времени выхода на стационарный тепловой режим при обработке сплава АК12

Как показал приведенный выше анализ динамики затвердевания расплава, важную роль в процессах теплообмена играет текущая температура колеса-кристаллизатора. Чем ниже температура данного элемента, тем быстрее происходит затвердевание расплава. Поэтому при исследовании нестационарного теплообмена была проведена оценка динамики изменения температуры в теле кристаллизатора в переходном тепловом режиме при различных величинах  $t_p$  и угловом удалении от места заливки расплава  $\varphi_i$  (см. рис. 4.5).

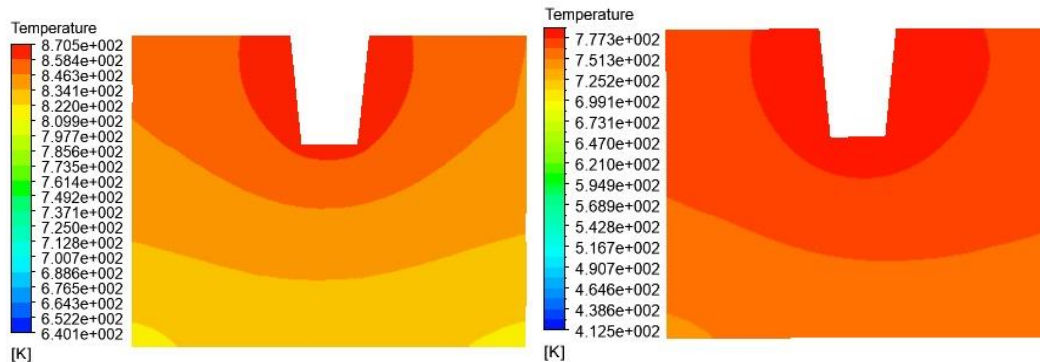
В качестве примера, на рис. 4.13 представлены некоторые расчетные температурные поля в сечениях кристаллизатора, при обработке сплава АК12 с  $t_3 = 635^\circ\text{C}$ , позволяющие судить о темпе его прогрева. Распределение расчетной температуры в разных временных диапазонах в сечениях кристаллизатора при температуре разлива сплава АК12 при различных значениях  $t_p$  представлено в Приложении В (рис. В.31–В.48).



a

b

Время переходного теплового процесса  $\tau_{пр} = 2$  мин.



a

b

Время выхода на стационарный тепловой режим  $\tau_{ст} = 21$  мин.

Рис. 4.13. Распределение температуры в контрольных сечениях кристаллизатора:  
a –  $\varphi = 30^\circ$ ; b –  $\varphi = 120^\circ$

Результаты расчета показывают, что распределение температур по ширине тела кристаллизатора имеет характерный максимум в области расположения канавки с расплавом. При этом в процессе прогрева кристаллизатора перепад температур по его ширине постепенно снижается.

Для определения темпа прогрева, результаты моделирования были обобщены в виде графиков, представленных на (рис. 4.14 – 4.16) На этих графиках показано распределение температуры вдоль линии, расположенной горизонтально в геометрическом центре сечения кристаллизатора.

Как видно из представленных выше рисунков эпюры имеют максимум в центре сечения и минимум по краям. Связано это в первую очередь с тем, что выбранная линия, для проведения анализа, проходит вблизи канавки с расплавом, которая расположена по центру кристаллизатора. Разница между

минимумом и максимумом температуры в процессе прогрева кристаллизатора постепенно уменьшается. Скорость прогрева кристаллизатора оценивалась по максимумам эпюр.

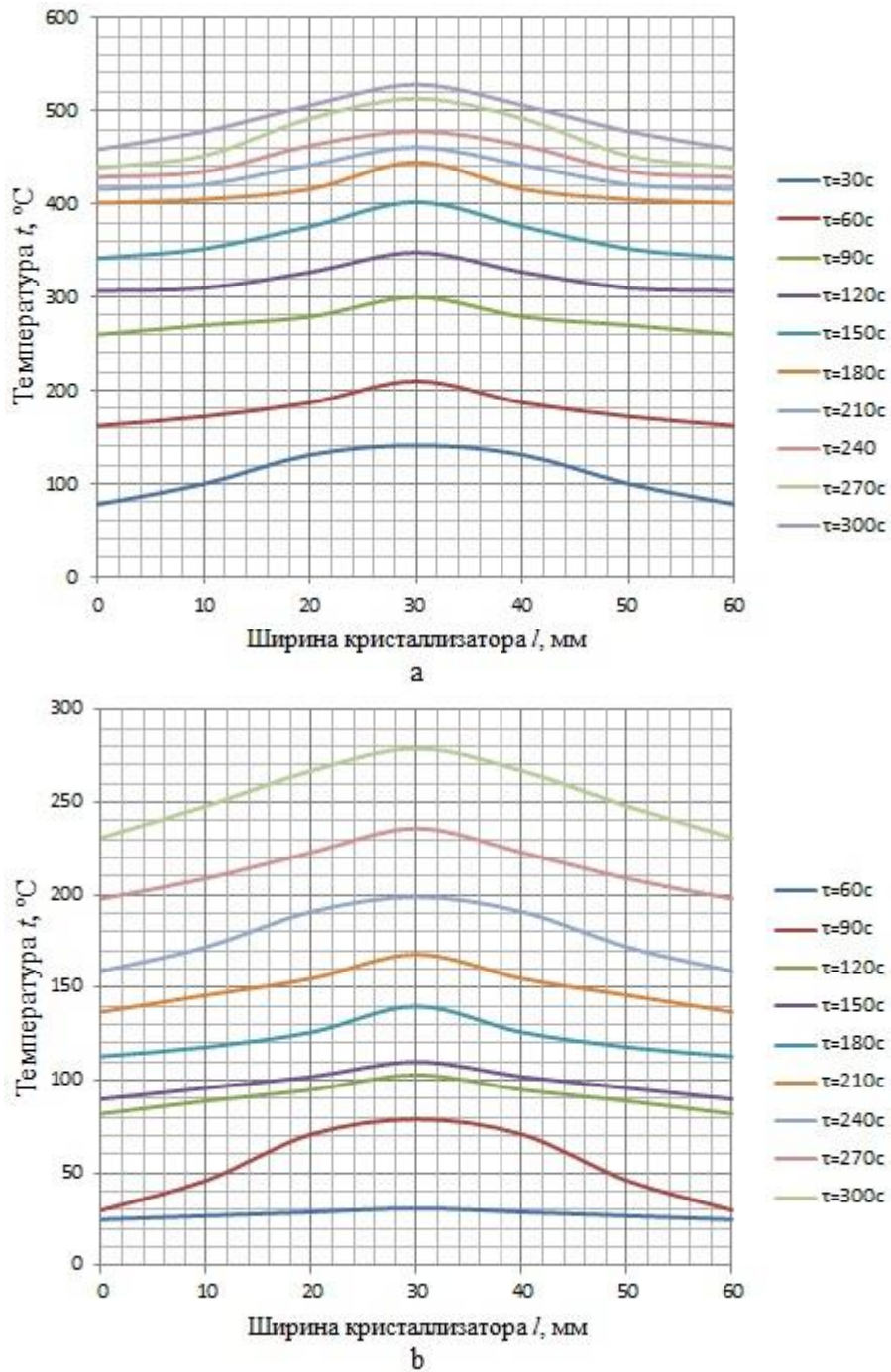


Рис. 4. 14. Распределение температуры в теле кристаллизатора при  $t_3 = 635 \text{ }^\circ\text{C}$ :

а – сечение на удалении от места заливки  $\varphi = 30^\circ$ ;

б – сечение на удалении от места заливки  $\varphi = 120^\circ$

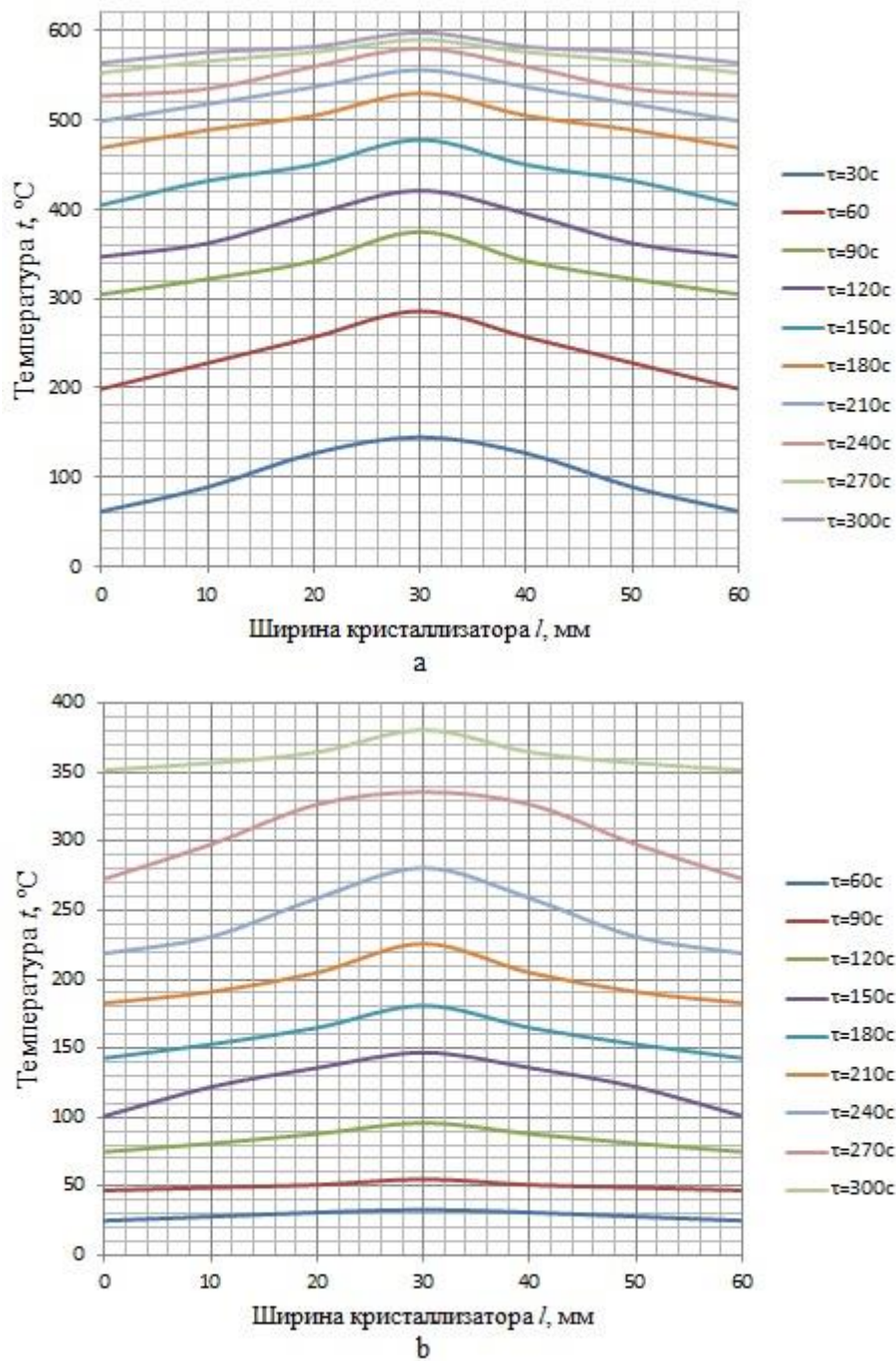


Рис. 4. 15. Распределение температуры в теле кристаллизатора при  $t_3 = 690^\circ\text{C}$ :

a – сечение на удалении от места заливки  $\varphi = 30^\circ$ ;

b – сечение на удалении от места заливки  $\varphi = 120^\circ$

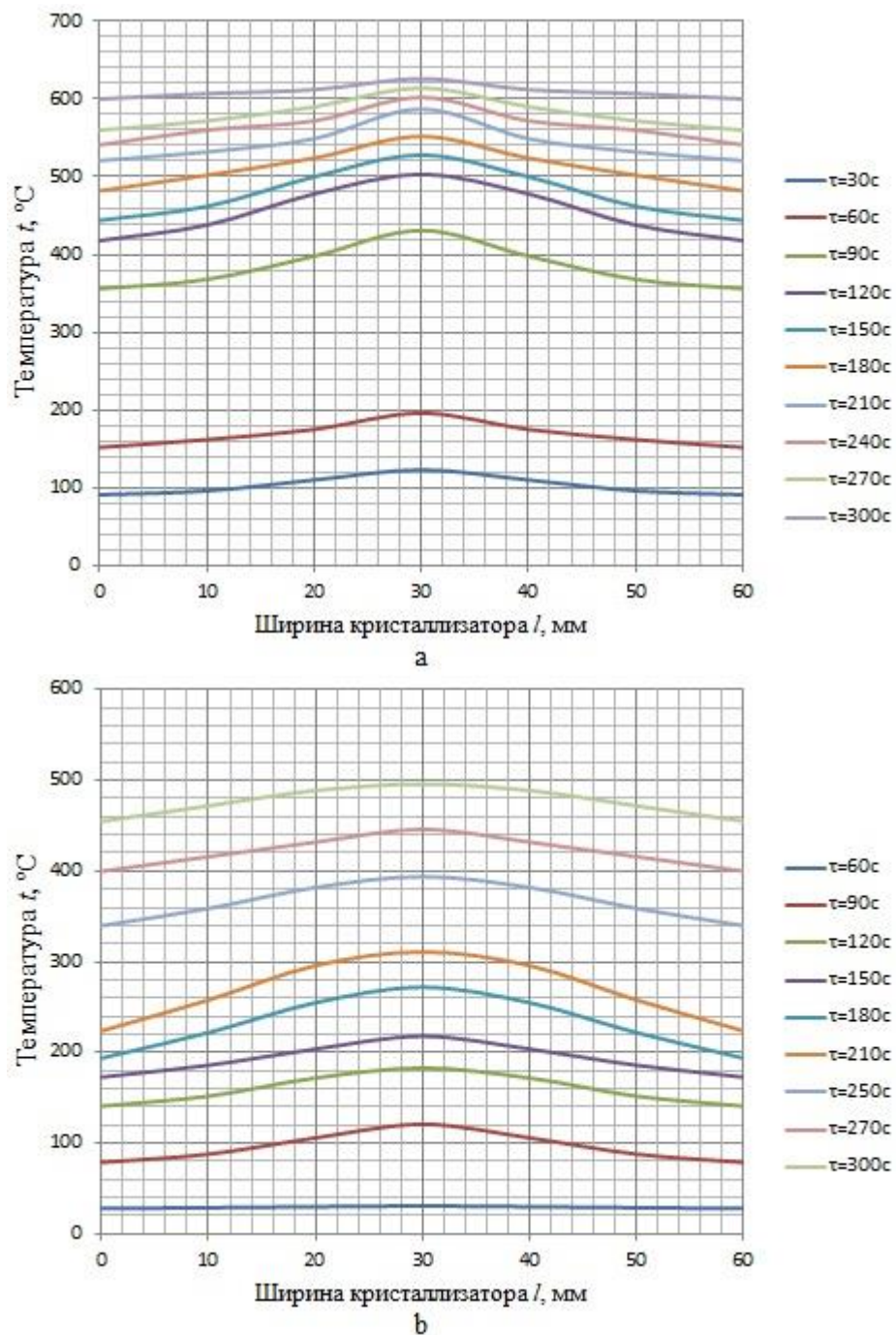


Рис. 4. 16. Распределение температуры в теле кристаллизатора при  $t_3 = 750^\circ\text{C}$ :  
 а - сечение на удалении от места заливки  $\varphi = 30^\circ$ ;  
 б - сечение на удалении от места заливки  $\varphi = 120^\circ$

Из приведенных графиков следует, что в момент времени от 30 до 60 с разница между эпюрами при  $t_3 = 635^\circ\text{C}$  составляет  $64^\circ\text{C}$ , по истечению 90 с –  $82^\circ\text{C}$ . Спустя 120 с, по мере прогрева рассматриваемого элемента, прирост температуры замедляется и составляет приблизительно  $0,33^\circ\text{C}/\text{с}$ .

Установлено, что после двух оборотов кристаллизатора наблюдается прирост его температуры в рассматриваемом сечении, что связано с аккумуляцией теплоты, вносимой расплавом.

Конструкция установки предусматривает наличие воздушной прослойки между относительно холодным корпусом и разогретым кристаллизатором. Теплообмен между этими элементами происходит через подшипники, температура которых может превысить рабочее значение и снизить эксплуатационную надежность установки в целом. Проведен анализ влияния теплового состояния нижней горизонтальной (внутренней) поверхности кристаллизатора на температурные условия работы подшипников в переходном тепловом режиме при различной величине  $\Delta t_p$ .

Расчеты показали, что максимальная температура внутренней поверхности кристаллизатора находится в области, расположенной под канавкой с расплавом, и в течение всего переходного периода  $\tau_{пр}$  продолжает расти. На (рис. 4.17–4.19) представлено изменение температуры по окружности внутренней поверхности колеса-кристаллизатора в зависимости от  $\tau_{пр}$  при перегреве расплава  $\Delta t_p$  в диапазоне 55–170 °С.

Как видно, на пятой минуте переходного процесса максимальная температура внутренней поверхности кристаллизатора в области заливки расплава достигает 480 °С (рис. 4.17), подшипников – 50 °С. При  $\Delta t_p = 170$  °С на этом промежутке времени указанные температуры имеют соответственно значения 582 и 82 °С.



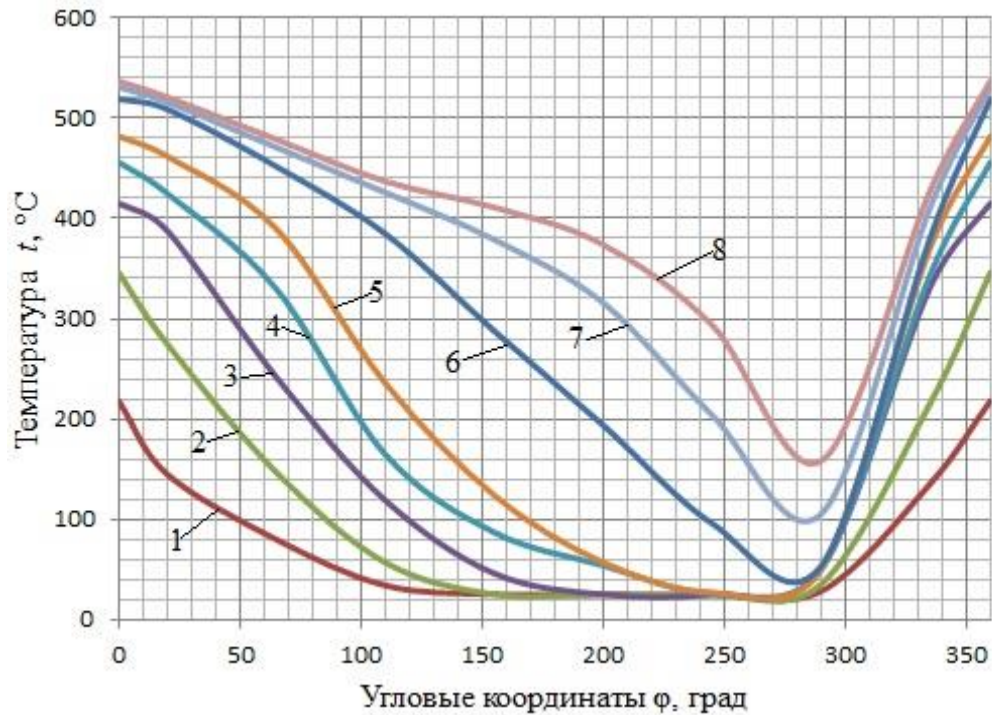


Рис. 4.17. Изменение максимальной температуры по окружности внутренней поверхности колеса-кристаллизатора при  $t_p = 635 \text{ }^\circ\text{C}$ :  
 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 8 – соответственно время от начала переходного процесса  $\tau_{пр} = 1, 2, 3, 4, 5, 9, 13$  и  $17$  мин.

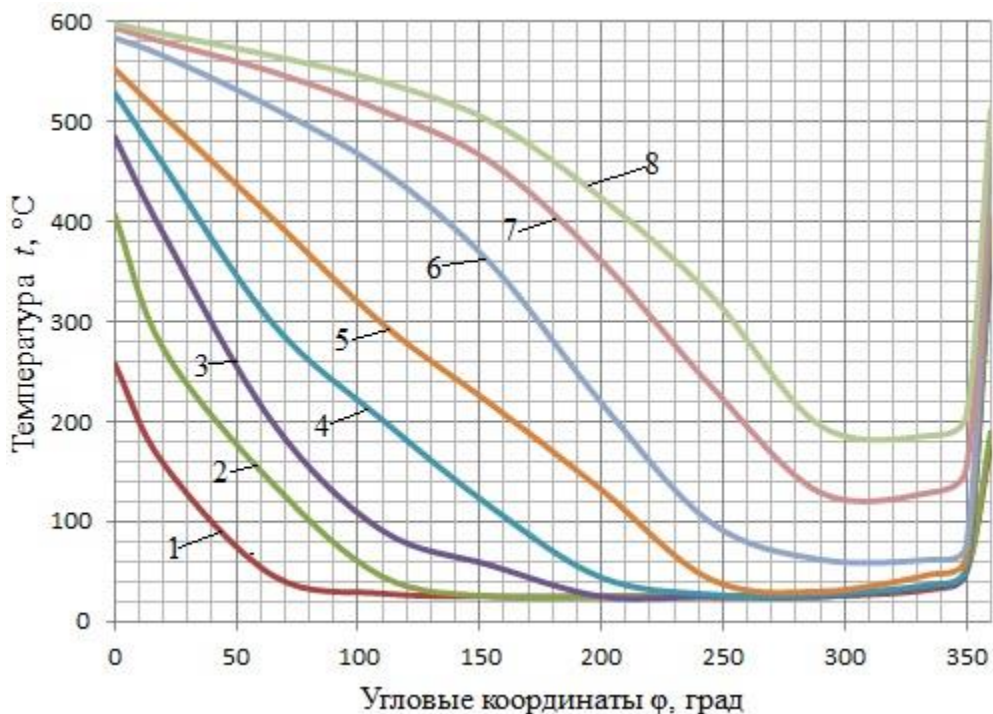


Рис. 4.18. Изменение максимальной температуры по окружности внутренней поверхности колеса-кристаллизатора при  $t_p = 690 \text{ }^\circ\text{C}$ :  
 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 8 – соответственно время от начала переходного процесса  $\tau_{пр} = 1, 2, 3, 4, 5, 9, 13$  и  $17$  мин.

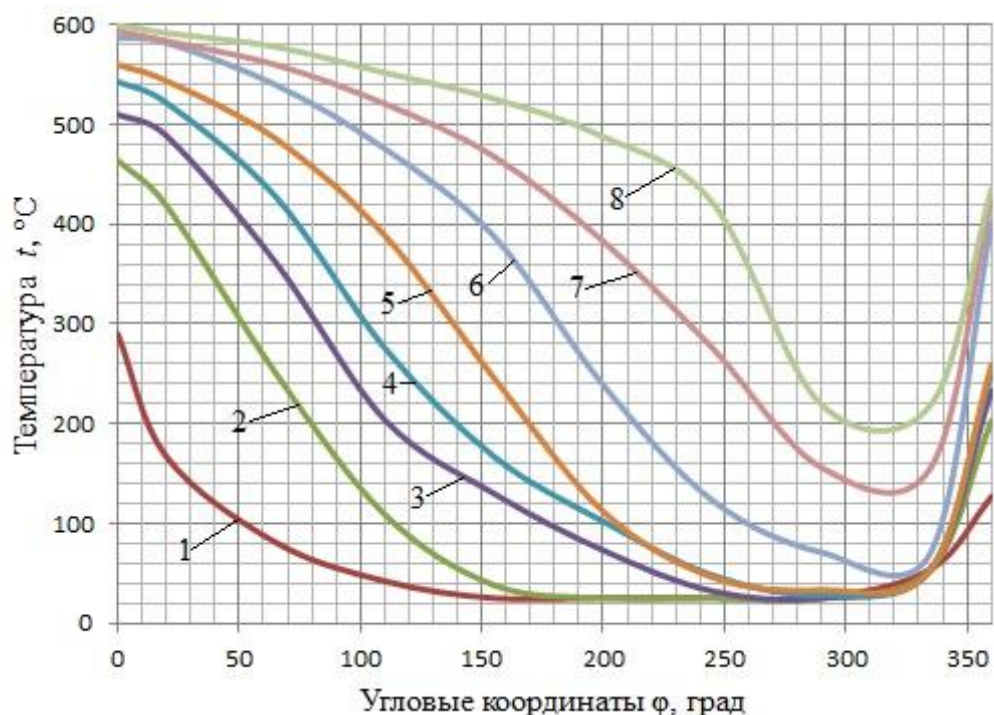


Рис. 4.19. Изменение максимальной температуры по окружности внутренней поверхности колеса-кристаллизатора при  $t_p = 750$  °С: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 8 – соответственно время от начала переходного процесса  $\tau_{пр} = 1, 2, 3, 4, 5, 9, 13$  и  $17$  мин.

Определено, что при выходе установки на стационарный тепловой режим температура подшипников при  $\Delta t_p = 55$  и  $170$  °С достигает соответственно  $164$  и  $204$  °С. Поэтому, для обеспечения оптимального температурного режима работы подшипников, особенно при высоких значениях перегрева расплава, требуется проведение дополнительных конструктивных мероприятий для их защиты от перегрева: установка дополнительной тепловой защиты или организации отбора излишней теплоты в области их контакта с внутренней поверхностью кристаллизатора.

Расчеты показали, что такое конструктивное изменение позволит снизить температуру подшипников до рабочих значений (рис. 4.20).

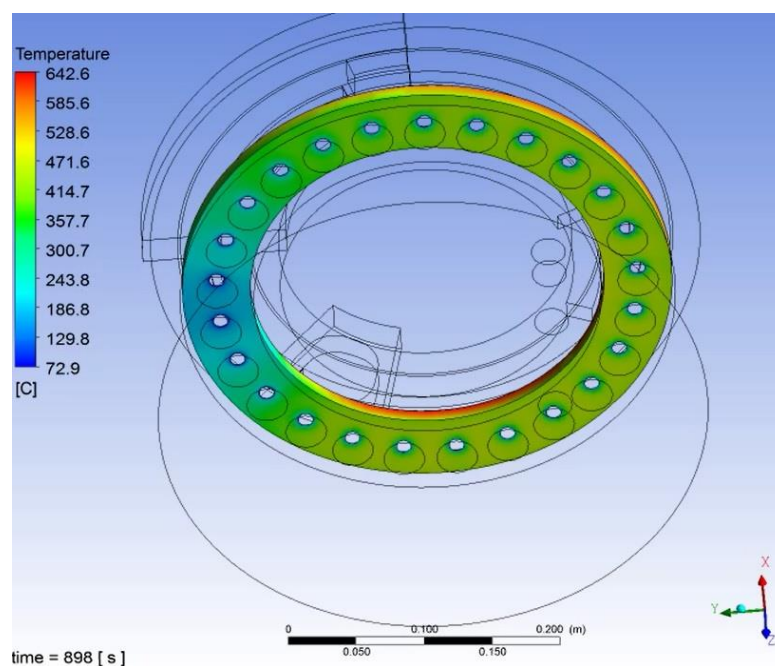


Рис. 4.20. Распределение температуры в теплоизоляционном слое между кристаллизатором и подшипниками

Так, расчетная температура в области контакта теплоизолятора с кристаллизатором составляет 642 °С, а температура в месте опоры подшипников на теплоизоляционный слой не превышает 180°С при  $\Delta t_p = 170$  °С. В этом случае наличие теплоизоляционной вставки позволяет при перегреве расплава  $\Delta t_p = 55$  °С уменьшить температуру подшипников в момент выхода установки на стационарный тепловой режим до 118 °С.

Результаты расчета температуры на внутренней поверхности кристаллизатора, контактирующей с подшипниками в разных временных диапазонах при температуре разлива сплава АК12, представлены в Приложении В (рис. В.49–В.51).

Одним из главных элементов установки является дугообразный сегмент с матрицей. Как отмечалось в [46], данная часть установки является наиболее термонапряженной. Результаты численного исследования сведены в графики, представленные на рис. 4.21–4.24. Расположение точек измерения в теле дугообразного сегмента рассмотрено в главе 2 (см. рис. 2.1).

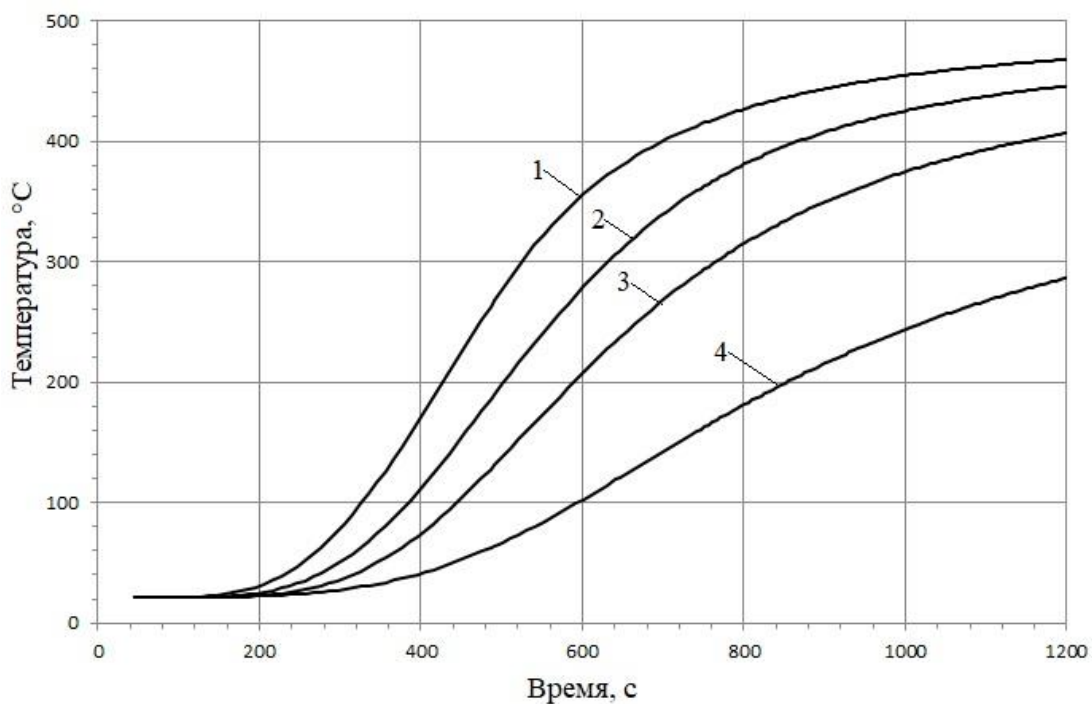


Рис. 4.21. Изменение температуры дугообразного сегмента в переходном тепловом режиме работы установки при  $t_p = 635^\circ\text{C}$  сплава АК12: 1, 2, 3 и 4 – температура в теле дугообразного сегмента соответственно в датчиках Т1, Т2, Т3 и Т4

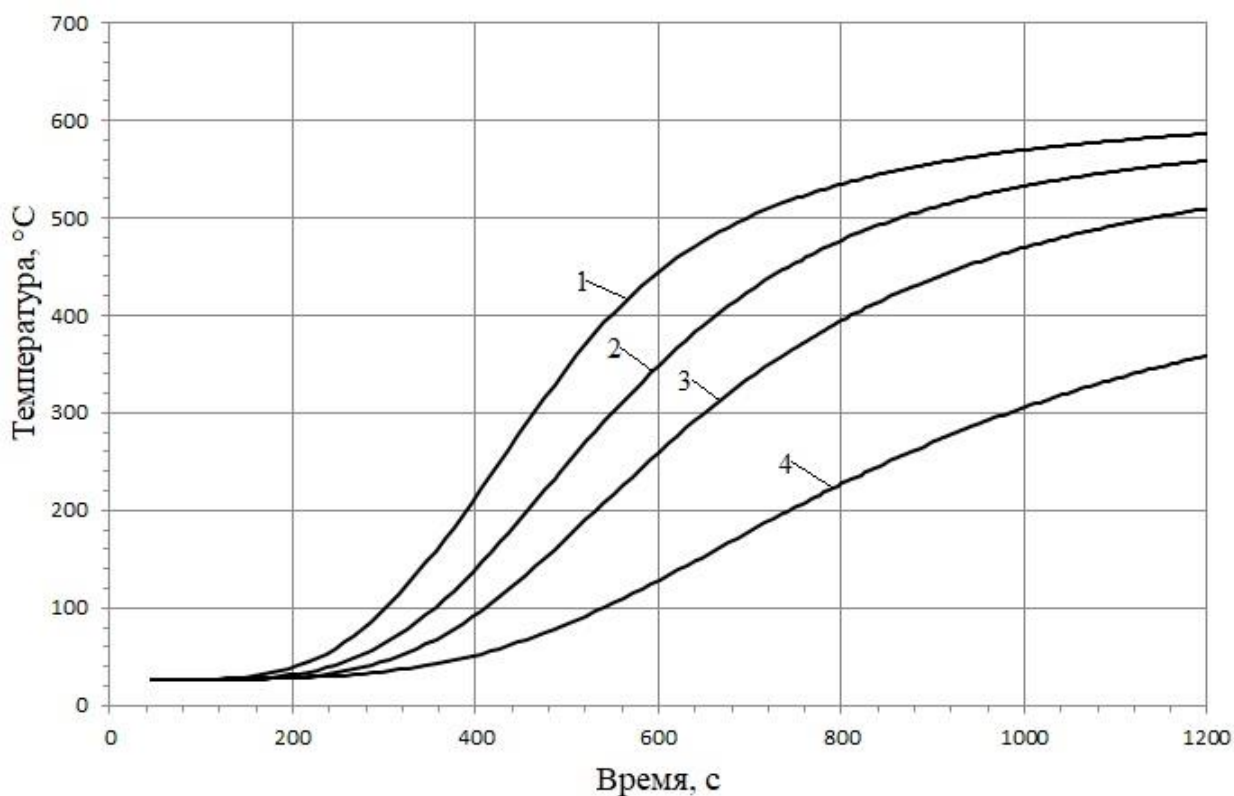


Рис. 4.22. Изменение температуры дугообразного сегмента в переходном тепловом режиме работы установки при  $t_p = 690^\circ\text{C}$  сплава АК12: 1, 2, 3 и 4 – температура в теле дугообразного сегмента соответственно в датчиках Т1, Т2, Т3 и Т4

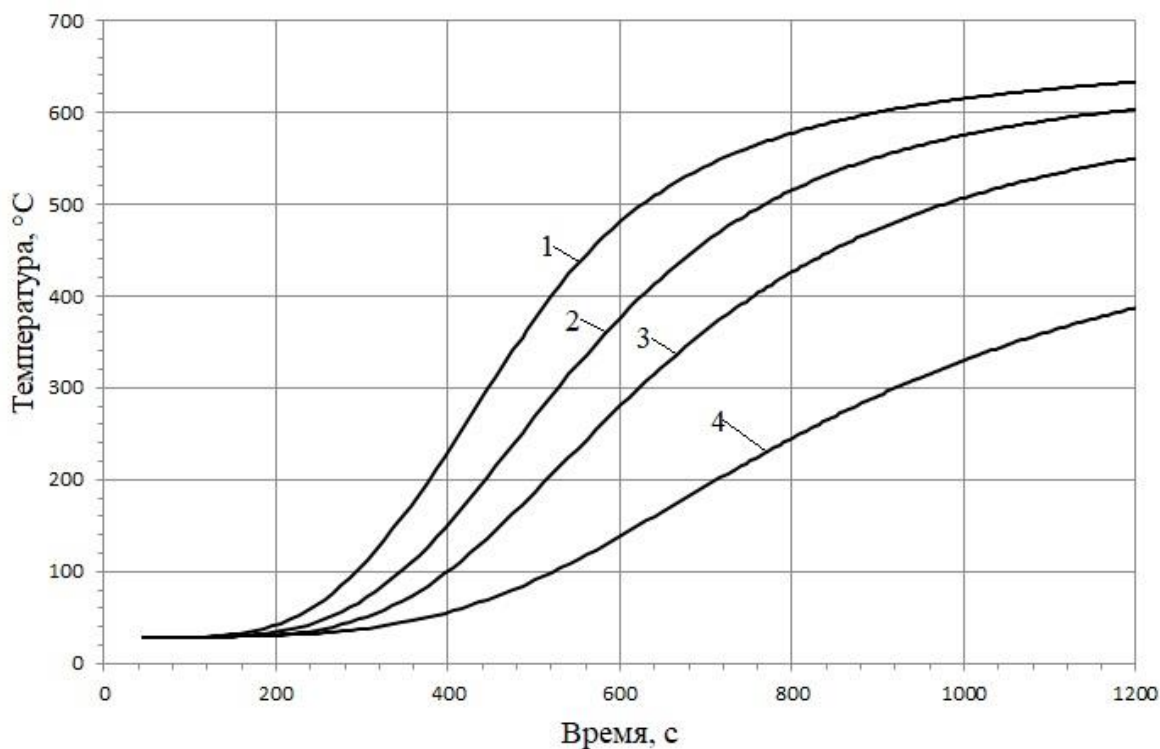


Рис. 4.23. Изменение температуры дугообразного сегмента в переходном тепловом режиме работы установки при  $t_p = 750^\circ\text{C}$  сплава АК12: 1, 2, 3 и 4 – температура в теле дугообразного сегмента соответственно в датчиках Т1, Т2, Т3 и Т4

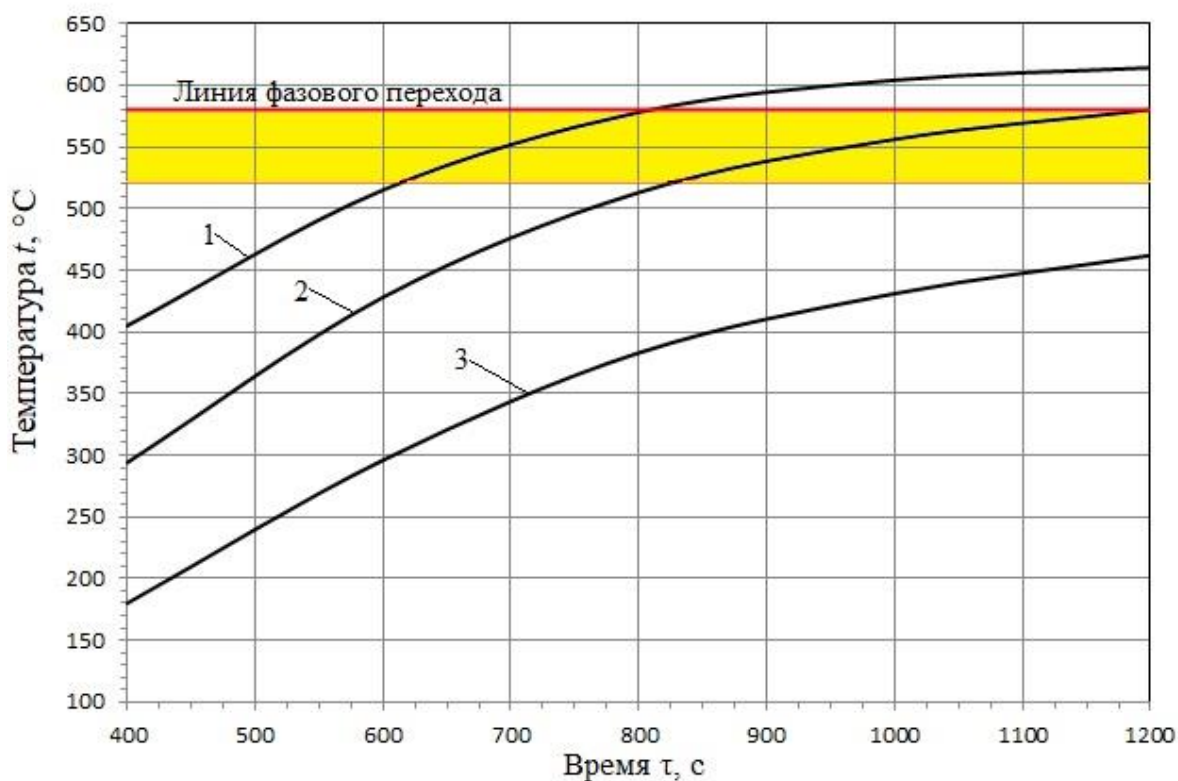


Рис. 4.24. Изменение температуры обрабатываемого сплава АК12 на выходе из матрицы в переходном тепловом режиме: 1 – температура заливки  $750^\circ\text{C}$ , 2 – температура заливки  $690^\circ\text{C}$ , 3 – температура заливки  $635^\circ\text{C}$

Из приведенных графиков следует, что температура дугообразного сегмента имеет довольно высокие температуры, которые существенно зависят от величины перегрева заливаемого расплава. При заливке сплава АК12 с  $\Delta t_p = 55$  °С температура дугообразного сегмента и соответственно металла на выходе из матрицы не превышает  $t_s$ . Данный факт позволяет эксплуатировать установку НСЛиП с ГК. При данной температуре заливки не нарушается технологический регламент совмещенного непрерывного литья и прессования: металл затвердевает в кристаллизаторе, до попадания под дугообразный сегмент с матрицей; на выходе из матрицы температура обрабатываемого металла не превышает  $t_s$ . Но при этом температура, при которой протекает процесс прессования, не соответствует условию горячего прессования (см. рис.4.24, кривая 3). Отметим, что на рис. 4.24 желтым цветом выделена область, соответствующая температуре горячего прессования для сплава АК12. В связи с этим предпочтителен процесс с температурой перегрева расплава до 110 °С и выше, что в зоне прессования условие горячего прессования. Однако через определенный промежуток времени необходимо обеспечить отбор излишнего количества теплоты. Так, например, при заливке расплава с температурой 750 °С требуемый промежуток времени переходного процесса составляет всего 180 с (см. рис.4.24, кривая 1); при заливке расплава с температурой 690 °С – 370 с (рис.4.24, кривая 2).

### 4.3. Выводы по главе 4

1. На основе трехмерной компьютерной модели сложного теплообмена в установке НСЛиП с ГК изучена динамика затвердевания опытных алюминиевых сплавов в переходном режиме ее работы.
2. Показана удовлетворительная сходимость результатов моделирования теплообмена с экспериментальными данными и возможность

проведения численного исследования процесса затвердевания алюминиевых сплавов.

3. В результате расчетно-экспериментального исследования динамики затвердевания алюминиевых сплавов выявлены пять теплотехнических зон в установке, характеризующихся различной степенью теплообмена в период от холодного пуска до момента стабилизации температуры всех ее элементов. При этом первые три зоны являются зонами подвода теплоты, две остальные – отвода теплоты к элементам конструкции установки и в окружающую среду.

4. Определено влияние характера теплообмена в переходном тепловом режиме на температурное поле по сечению затвердевающего расплава АК12 при различном его удалении от места заливки и величине его перегрева. Показано, что по мере разогрева кристаллизатора в переходном процессе возрастает несимметричность температурного поля затвердевающего расплава, которое в контрольном сечении вблизи инструмента прессования характеризуется сдвигом области с максимальной температурой к контактирующей поверхности кристаллизатора.

5. Установлено, что продолжительность переходного процесса при пуске установки из холодного состояния до достижения ею установившегося теплового режима, а также длина дуги затвердевания металла зависят от температуры заливаемого расплава и темпа разогрева кристаллизатора. Определено, что увеличение перегрева заливаемого расплава на 10 °С приводит к возрастанию времени переходного процесса в среднем на 1 минуту. По мере прогрева кристаллизатора длина дуги затвердевания металла возрастает. Так, при температуре заливки расплава 750°С темп изменения длины дуги затвердевания составляет 0,16 м в минуту.

6. Определен максимальный предел величины перегрева алюминиевых деформируемых сплавов перед заливкой, равный 670-675 °С, выше которого при реализации технологии непрерывного совмещенного литья и прессования в установке данной конструкции расплав не

затвердевает в кристаллизаторе, а попадает под инструмент прессования в жидкой фазе и требует организации принудительного охлаждения кристаллизатора.

7. Проведена оценка динамики изменения температуры кристаллизатора во всем периоде переходного теплового процесса при различной величине перегрева расплава. Показано, что рабочая температура подшипников превышает допустимую величину, что приводит к необходимости проведения конструктивных мероприятий, обеспечивающих отбор излишней теплоты в области их контакта с внутренней поверхностью кристаллизатора. Предложено установить теплоизоляционный слой между кристаллизатором и подшипниками, обеспечивающий поддержание их рабочей температуры на уровне, не превышающем максимально допустимые значения.

8. Проведена оценка влияния прогрева кристаллизатора и дугообразного сегмента в переходном тепловом процессе. Установлено, что для поддержания требуемого по технологии диапазона температуры металла перед его горячим прессованием необходимо при высоком уровне перегрева заливаемого расплава обеспечить отбор излишней теплоты от колеса-кристаллизатора и дугообразного сегмента.



## ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА СИСТЕМЫ ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ УСТАНОВКИ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ КРИСТАЛЛИЗАТОРОМ

В ходе экспериментальных и численных исследований было определено, что в результате постепенного нагрева элементов установки в зоне контакта движущегося кристаллизатора с подшипниками выгорает смазка и дальнейшая ее эксплуатация становится невозможной. Результаты также показали, что наиболее теплонапряженным элементом является дугообразный сегмент с матрицей в зоне прессования металла. Связано это с тем, что при прессовании имеет место выделение теплоты в результате трения о стенки кристаллизатора и пластической деформации металла. В определенный момент времени температура дугообразного сегмента превышает величину  $T_{sol}$  обрабатываемого сплава и происходит нарушение технологического процесса.

Для создания изотермических условий в процессе непрерывного процесса литья и прессования необходимо обеспечить отбор излишнего количества теплоты, в противном случае непостоянная температура пресс-изделия на выходе из канала матрицы приводит к разбросу механических свойств и искажению геометрии по длине и поперечному сечению пресс-изделий, что снижает качество продукции. Следует отметить, что при достижении температуры близкой к температуре плавления прессуемого металла происходит разрушение пресс-изделия, что является окончательным браком [10].

Решение данной проблемы связано с разработкой принудительного охлаждения термонапряженных элементов установки.

## 5.1. Разработка конструкции установки с водяным охлаждением

Технологический процесс совмещённых процессов литья и прессования должен отвечать следующим требованиям: жидкий металл не затвердевает в начальной фазе процесса; скорость перемещения расплава постоянна и соответствует скорости его затвердевания, определяемой интенсивностью теплоотвода от прессового инструмента; в потоке расплава исключена турбулентность; температура металла перед попаданием под пресс-матрицу должна быть ниже номинальной температуры его затвердевания  $T_{sol}$ .

Наиболее перспективным устройством для охлаждения установки является патент на полезную модель РФ №111784 [39], схема которого представлена на рис. 5.1.

Данное устройство имеет подводящие и отводящие патрубки в корпусе, для охлаждения дна кристаллизатора, и на верхней поверхности дугообразного сегмента, для отвода избыточного тепла образующегося в процессе прессования металла. Недостатком данной системы охлаждения является отсутствие направленных потоков жидкости в охлаждаемых объёмах, в результате чего может произойти ее вскипание.

С целью повышения эксплуатационной надёжности установки и выполнения технологического регламента разработана система принудительного водяного охлаждения ее элементов, учитывающая особенности технологического процесса. Предложена следующая конструктивная модификация установки [102] (рис. 5.2):

- на поверхности дугообразного сегмента устанавливается змеевик-теплообменник из стали толщиной 1 мм, обеспечивающий требуемый температурный режим дугообразного сегмента и алюминиевого прутка на выходе из матрицы;

- в корпусе рядом с подшипниками располагаются кольцевые профилированные каналы (шириной 5 мм, высотой 10 мм) из стали

толщиной 1 мм, обеспечивающие необходимый температурный режим корпуса и системы вращения установки;

– между кристаллизатором и подшипниками устанавливается изоляционная прослойка из оксидалюминиевой керамики толщиной 10 мм.

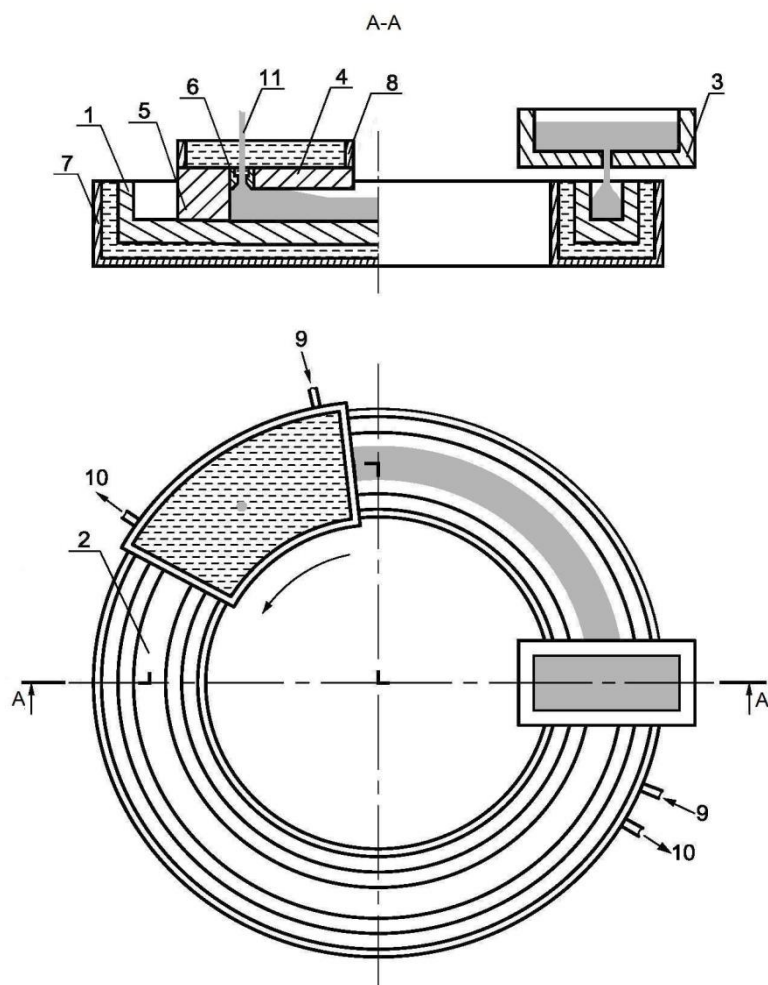


Рис. 5.1. Устройство для охлаждения инструмента установки непрерывного литья – прессования [39]:

1 – кристаллизатор; 2 – канавка; 3 – дозатор; 4 – дугообразный сегмент; 5 – упор; 6 – матрица; 7, 8 – коллекторы; 9, 10 – патрубки; 11 – пресс-изделие

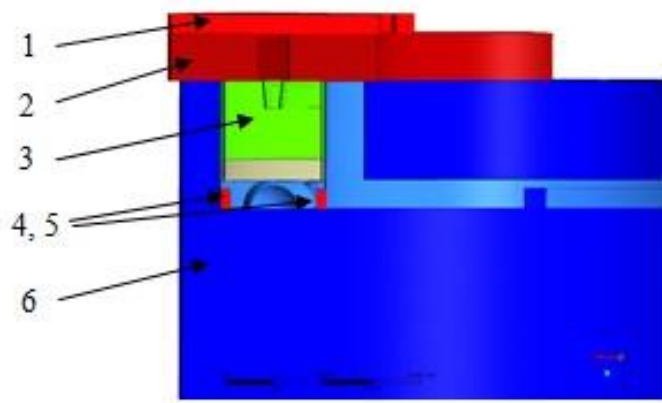


Рис. 5.2. Схема системы водяного охлаждения установки НСЛиП с ГК:  
 1 – змеевик-теплообменник; 2 – дугообразный сегмент с матрицей;  
 3 – кристаллизатор; 4, 5 – кольцевые профилированные каналы; 6 – корпус

## 5.2. Компьютерная модель установки с принудительным охлаждением элементов

Численное исследование теплообмена проведено с использованием компьютерной модели установки с водяной системой охлаждения, разработанной ранее на базе программного комплексе Ansys CFX. Математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений сохранения энергии, включающих члены, отвечающие за внутреннее тепловыделение при обработке сплавов в процессе кристаллизации и прессования, описана ранее в главе 3.

Для моделирования переноса хладагента решаются уравнение Навье-Стокса, сохранения массы и импульса.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho F_x, \\
 \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho F_y, \\
 \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) + \rho F_z.
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

При оснащении установки водяной системой охлаждения дугообразного сегмента (Домены «WATER 1», «WATER 2» и «WATER 3») величина  $\alpha_i$  представляет собой коэффициент теплопередачи  $K_{\text{охл}}$ , определяемый по соотношению:

$$\alpha_i = K_{\text{охл}} = \frac{1}{1/\alpha_{\text{дс}} + \delta_{\text{дс}}/\lambda_{\text{дс}} + 1/\alpha_{\text{вод}}}, \quad (5.2)$$

где  $\delta_{\text{дс}}$  и  $\lambda_{\text{дс}}$  – толщина и коэффициент теплопроводности материала дугообразного сегмента;  $\alpha_{\text{дс}}$  и  $\alpha_{\text{вод}}$  – соответственно коэффициент теплоотдачи от затвердевшего металла к поверхности дугообразного сегмента и от внутренней поверхности змеевиков к воде.

При моделировании переноса хладагента решаются уравнения Навье-Стокса, сохранения массы и импульса, теплоотдачи в системе «вода-твёрдое тело» – уравнение энергии с конвективными членами во всех доменах «WATER».

При определении параметров надёжной работы установки НСЛиП с водяной системой охлаждения был добавлен домен «WATER 1», соответствующий змеевику, расположенному на дугообразном сегменте и содержащий 382000 элементов, перегородки змеевика состоящие из 7560 ячеек. Домен «WATER 2» и «WATER 3» соответствуют кольцевым профилированным каналам, расположенным в корпусе на внутренней и внешней стороне относительно подшипников и состоят из 135000 и 102000 элементов соответственно (рис.5.3).

Домен корпус (CORPUS) состоящий из 6258000 элементов. Домен кристаллизатор (CRISTALLYZER) состоящий из 5390000 элементов. Домен изоляционный слой (INSULATOR) состоящий 844000 элементов. Домен дугообразный сегмент с матрицей (MATRIX) состоящей из 1034000 элементов. Домен подставки дозатора (PODSTAVKA) состоящей из 386000 элементов. Домен воздушной прослойки между кристаллизатором и

корпусом (SOLID AIR) состоящий из 2567000 ячеек. Домен обрабатываемого расплава разделён на два: (GROOVE) – участок от места заливки до дугообразного сегмента с матрицей (зона кристаллизации), состоящий из 1121000 элемента и (GROOVE 2) – участок обрабатываемого металла, находящегося под дугообразным сегментом (зона прессования) и состоящий из 205000 элементов. Размер сетки в итоговом расчете всей модели составил 18,4 млн. ячеек. На основе преобразованной сеточной модели создаётся расчётная модель, путём наложения граничных и начальных условий, параметров моделируемых процессов и задания настроек решателя.

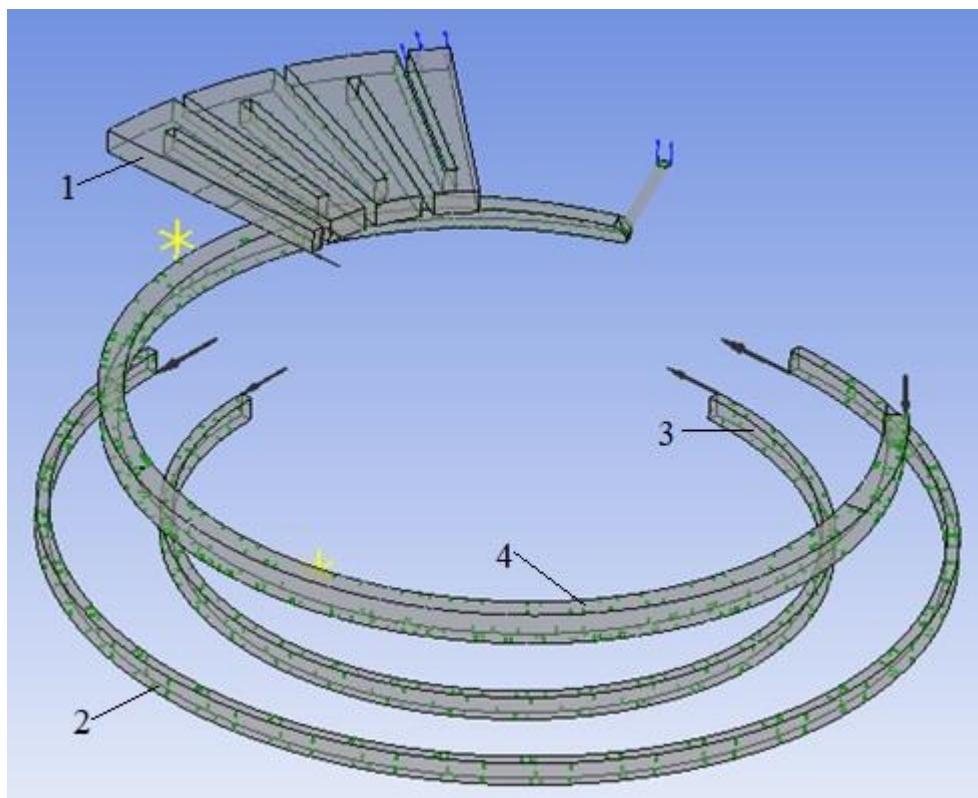


Рис. 5.3. Домены системы охлаждения:  
1 - домен WATER 1; 2- домен WATER 2; 3 - домен WATER 3;  
4 – домен металла GROOVE и GROOVE 2

На рис. 5.4 представлены домены системы охлаждения.

Домен *Water 1* соответствует змеевику теплообменнику над дугообразным сегментом, *Water 2* – внешний профилированный канал, *Water 3* – соответственно внутренний канал. Начальные и граничные условия в

данных доменах задаются следующим образом: во вкладке *Basic Settings* выбирается тип домена и материал, в данном случае *Domain Type* → *Fluid Domain*; *Material* → *water*, *Morphology* → *Continuous Fluid*; *Domain Models* → *Reference Pressure = 1 [atm]*; *Buoyancy Model* → *Non Buoyant*, *Domain Motion* → *Stationary*. Настройки вкладки *Fluid Models* → *Multiphase* → ставится галочка *Homogeneous Model*, *Free Surface Model* → *None*. *Heat Transfer* → ставится галочка *Homogeneous Model*, *Option* → *Thermal Energy*, *Turbulence* → *Option* → *k-Epsilon*.

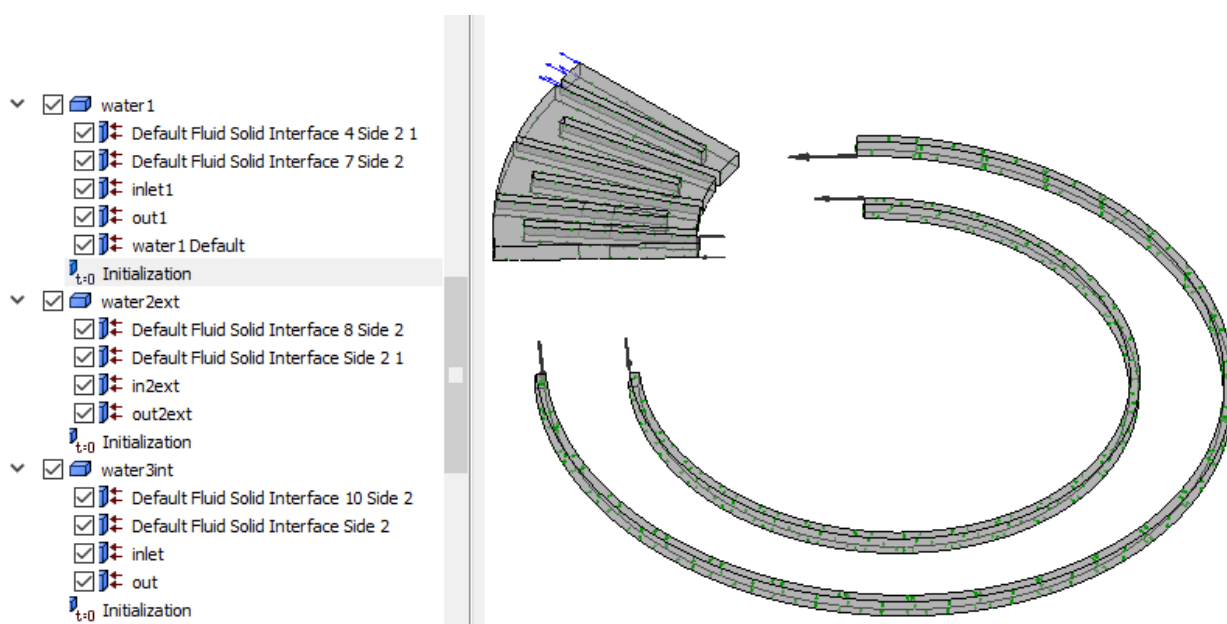


Рис. 5.4. Поверхности доменов системы охлаждения

Выделяется поверхность *Inlet*, во вкладке *Basic Settings* → *Boundary Type* → *Inlet*; *Boundary Details* → *Flow Regime* → *Option = Subsonic*; *Mass And Momentum* → *Option = Normal Speed*; *Normal Speed = 1[m/s]*, для каждого из доменов задаётся своя скорость потока хладагента. *Turbulence* → *Option = Medium (Intensity = 5%)*; *Heat Transfer* → *Option* → *Static Temperature*, *Static Temperature = 15 [°C]*.

Далее выделяется поверхность *Outlet*, во вкладке *Basic Settings* → *Boundary Type* → *Opening*; *Boundary Details* → *Flow Regime* → *Option = Subsonic*; *Mass And Momentum* → *Option = Opening Pres. And Dirn*; *Turbulence*

→ *Option = Medium (Intensity = 5%); Heat Transfer → Option → Opening Temperature.*

Для поверхностей, контактирующих с воздухом и другими элементами установки, граничные и начальные условия задаются в соответствии с ранее описанной методикой в главе 3. Компьютерная модель модернизированной установки непрерывного совмещённого литья и прессования с горизонтальным кристаллизатором (НСЛиП с ГКМ) представлена на рис. 5.5.

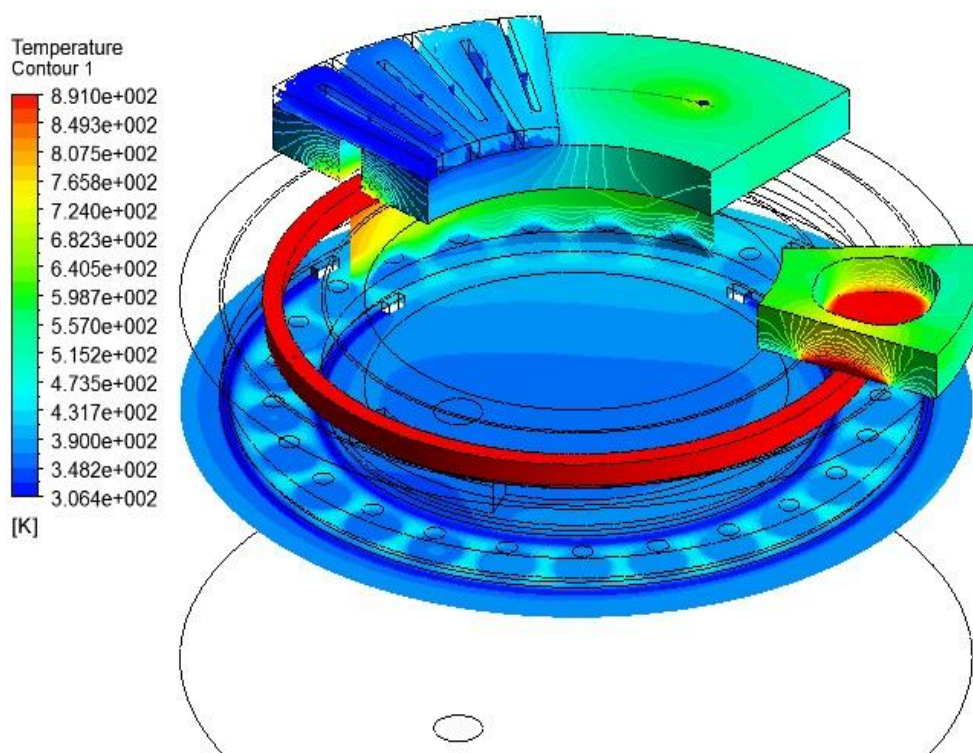


Рис. 5.5. Компьютерная модель установки НСЛиП с ГКМ

В расчетах расплав АК12 с массовым расходом 9 г/с заливается в кристаллизатор при температуре 750 °С через дозатор с диаметром выходного сечения 1,8 мм, установленный на зафиксированной относительно корпуса подставке. На дугообразном сегменте через матрицу задается выход затвердевшего алюминия из модели с соответствующим расходом. Направление вращения кристаллизатора по часовой стрелке. Температура окружающей среды составляет 20 °С. Вращающийся кристаллизатор переносит затвердевающий расплав до дугообразного сегмента с матрицей с угловой скоростью 0,21 рад/с (2 об/мин). Для системы охлаждения в качестве



хладагента используется вода с температурой 15 °С. Направление потока в змеевике-теплообменнике по ходу движения кристаллизатора перекрестным током. В профилированных каналах направление движения против хода кристаллизатора. Для определения требуемых по технологии параметров тепловой работы установки расход воды в охлаждаемых элементах варьировался в широком диапазоне.

### **5.3. Отработка рационального режима водяного охлаждения элементов установки**

Отработка режим работы системы охлаждения проводилась при литье-прессовании опытного сплава АК12 с учетом следующих технологических требований:

- температура заливки расплава составляет 750 °С;
- место заливки расплава находится на удалении 225° от дугообразного сегмента;
- обрабатываемый сплав попадает под дугообразный сегмент при температуре на 1...2 °С ниже  $T_{sol}$ ;
- температура прутка на выходе из матрицы не превышает  $0,9T_{sol}$ ;
- температура подшипников не превышает 180 °С (0,9 от максимально допустимой).

В результате серии расчетов определена зависимость угла затвердевания расплава от расхода воды (рис. 5.6) [102]. Полученную зависимость можно использовать как номограмму, позволяющую определить необходимый расход воды и место установки дозатора, при которых не будет нарушен технологический процесс литья-прессования деформируемого алюминиевого сплава. Отметим, что такая зависимость может быть использована в системе автоматического управления процессом литья и прессования деформируемых алюминиевых сплавов. Так, например, при выходе установки на стационарный тепловой режим для обеспечения угла

затвердевания сплава АК12  $\varphi_s = 140^\circ$  необходимо подать расход хладагента через патрубки теплообменника на дугообразном сегменте 0,093 кг/с, по профилированным каналам – 0,137 кг/с.

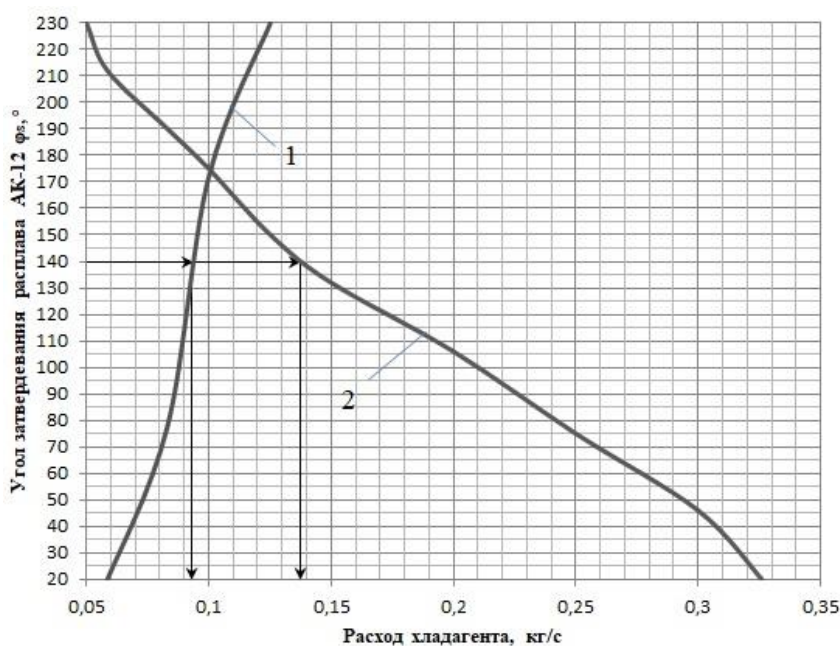


Рис. 5.6. Изменение угла затвердевания расплава АК12  $\varphi_s$  в зависимости от расхода хладагента:  
 1 – расход в теплообменнике над дугообразным сегментом;  
 2 – расход в профилированных каналах

Анализ результатов расчета при моделировании литья-прессования сплава АК12 показал, что наиболее рациональным является режим работы при массовом расходе воды, кг/с: в змеевике, расположенном на дугообразном сегменте, – 0,13; в каждом кольцевом профилированном канале, расположенном в корпусе (внешнем и внутреннем), – 0,06. При данных расходах хладагента соблюдаются условия технологического процесса: температура сплава АК12 перед попаданием под дугообразный сегмент не превышает величину  $T_{sol}$ , прутка на выходе из матрицы –  $427^\circ\text{C}$ .

Количество теплоты, отбираемой системой охлаждения от элементов установки  $Q$  можно рассчитать, воспользовавшись следующей формулой, Вт:

$$Q = mc(T_2 - T_1), \quad (5.3)$$

где  $Q$  – количество теплоты, отбираемой системой охлаждения от элементов установки, Вт;  $m$  – расход хладагента, кг/с;  $c$  – теплоемкость хладагента (вода) 4,186 кДж/(кг К);  $T_1$  и  $T_2$  – температура хладагента на входе в контур охлаждения и на выходе из него, К.

Система охлаждения имеет две зоны и три контура, соответственно в зоне прессования, для контура охлаждения дугообразного сегмента, согласно формулы (5.3) количество отбираемой теплоты  $Q_{\text{сегм.}} = 45,17$  кВт:

В зоне контакта кристаллизатора с подшипниками, система охлаждения имеет два контура, внешний и внутренний профилированный канал, относительно подшипников. Тогда количество отбираемой теплоты  $Q_{\text{п. внеш.}}$  и  $Q_{\text{п. вн.}}$ , составит соответственно 8,79 и 7,79 кВт:

Таким образом, для обеспечения надежной работы установки НСЛиП с ГК при обработке сплава АК12 с температурой заливки расплава  $t_p = 750$  °С, необходимо отбирать от её элементов 61,75 кВт тепловой энергии.

На рис. 5.7 показан разработанный режим работы системы охлаждения при литье-прессовании сплава АК12. Как видно, в момент пуска установки включается охлаждение по профилированным каналам в зоне контакта движущегося кристаллизатора с подшипниками. В ходе нестационарного теплового процесса расход хладагента по мере прогрева кристаллизатора линейно возрастает с темпом примерно  $1,0 \cdot 10^{-3}$  кг/с (кривая 1). Максимальный расход воды в профилированных каналах достигается при прогреве до 150 °С нижней поверхности изоляционного слоя в зоне заливки расплава. Расчеты показывают, что при таком режиме охлаждения рабочая температура в зоне контакта подшипников с изоляционным слоем в области заливки металла не превышает 200 °С. При этом угол между затвердевшим сечением расплава и дугообразным сегментом составляет 10°, что полностью исключает возможность попадания жидкой фазы в зону прессования. По мере прогрева кристаллизатора изменяется длина дуги затвердевания  $\varphi_s$ . Поэтому при достижении величины  $\varphi_s = 220^\circ$  подается вода в змеевик-теплообменник для охлаждения дугообразного сегмента (кривая 2).

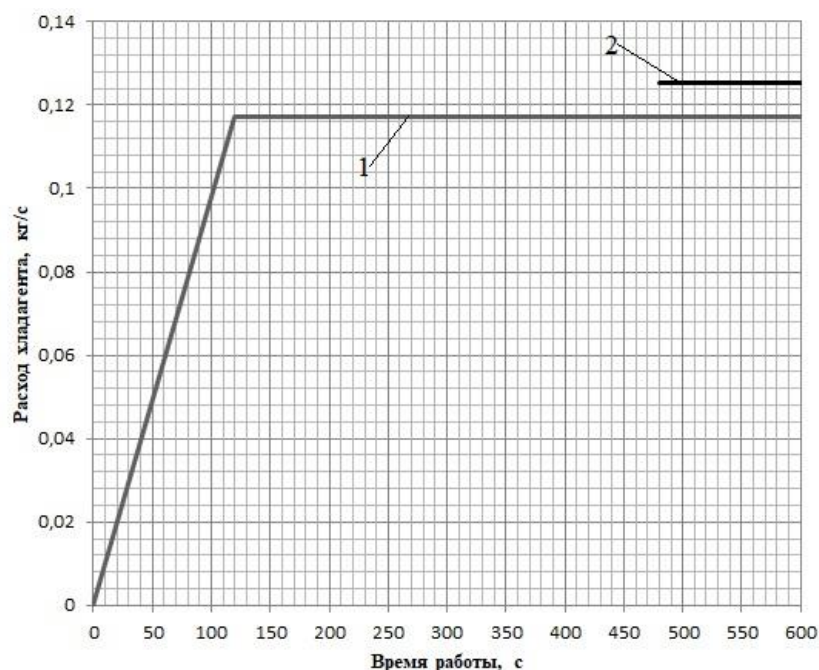


Рис. 5.7. Режим работы системы охлаждения при обработке сплава АК12:  
 1 – расход в профилированных каналах;  
 2 – расход в змеевике-теплообменнике

При дальнейшей эксплуатации установка полностью прогревается и выходит на стационарный тепловой режим. Расчеты показывают, что система охлаждения дугообразного сегмента позволяет компенсировать тепловыделение, возникающее за счет деформации сплава и сил контактного трения (рис. 5.8). Как видно, температурный уровень элементов установки не превышает значения, определенные технологическим регламентом. Так, температура элементов установки не превышает величину  $T_{sol}$  сплава и составляет: подшипников в зоне прессования –  $160^{\circ}$ , в область контакта подшипников с изоляционным слоем –  $200^{\circ}$ , обрабатываемого сплава на выходе из матрицы –  $427^{\circ}\text{C}$ .

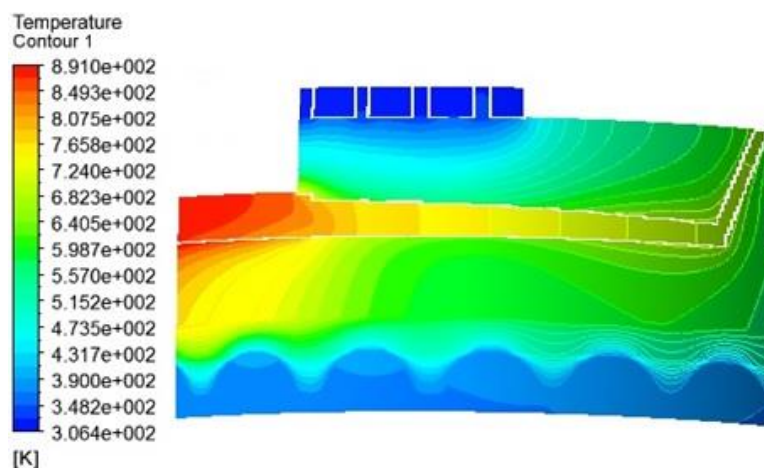


Рис. 5.8. Распределение температуры элементов установки НСЛиП с ГКМ в сечении зоны прессования

#### 5.4. Разработка устройств терморегулирования и управления тепловым режимом

В ходе исследования был получен патент на изобретение «Устройство управления тепловым режимом установки непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов» [142], представленное на рис. 5.9.

Данное устройство для непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов методом конформ включает дозатор 1, основание дозатора 2 с установленным на нем электроприводом 5, и роликами 8 позволяющие изменять положение дозатора 1, на корпусе установки 4 выполнены углубления для роликов 8, кристаллизатор 3, выполненный в виде диска с возможностью вращения в горизонтальной плоскости, имеющим кольцевую канавку 13 на верхней части диска, и сопрягающийся с ней неподвижный дугообразный сегмент 14 с матрицей 15 и с выступом, перекрывающим поперечное сечение кольцевой канавки 13. На дугообразном сегменте 14 и дозаторе 1, установлены датчики температуры 9, соединённые с контроллером 7, который связан с электроприводом 5, который соединён с шестерёнкой 6 образующей с зубьями 12 на корпусе установки шестерённую передачу, также устанавливается дугообразная направляющая 10, закреплённая на корпусе П-образными креплениями 11 с пружинами 15.

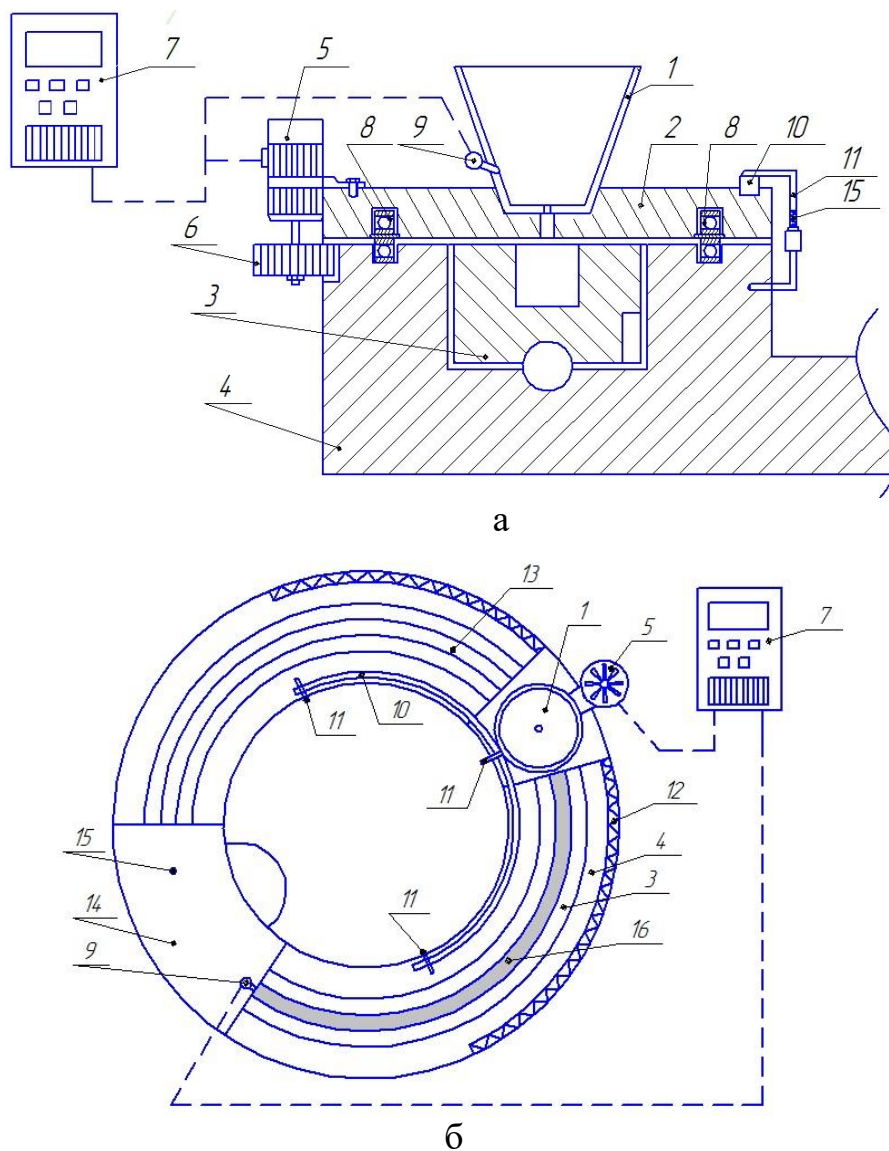


Рис. 5.9. Схема устройства управления тепловым режимом установки НСЛиП с ГК:

а – сечение конструктивных элементов в области заливки;  
 б – общий вид сверху

Во время работы, приводится во вращение кристаллизатор 3. Расплавленный металл из печи-миксера с питателем (на чертеже не показаны) поступает в дозатор 1 и далее заливается в кольцевую канавку 13, выполненную на верхней части диска кристаллизатора 3. За время движения до дугообразного сегмента 14 расплавленный металл 16 охлаждается, кристаллизуется и принимает форму поперечного сечения канавки 13 и достигает дугообразный сегмент 14, где под действием активных сил контактного трения между стенками кольцевой канавки 13 и

деформируемым металлом 16 происходит его выдавливание в проволоку, через рабочий канал матрицы 15. Длина дуги кристаллизации металла регулируется контроллером 7, смещая дозатор 1 электроприводом 5, установленным на основании дозатора 2, в зависимости от температуры на датчиках температуры 9 либо в сторону неподвижного дугообразного сегмента 14, либо в противоположную сторону. Таким образом, в заявляемом устройстве реализуется управление тепловым режимом в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов.

Основной задачей устройства является управление тепловым процессом в момент затвердевания металла или сплава с момента холодного пуска до наступления установившегося теплового режима работа установки при изменяющихся температурных условиях во времени. Конструктивные особенности заявляемого устройства по сравнению с прототипом, характеризующиеся отличительными признаками, обеспечивают термостабильную работу установки в начальный момент работы после холодного пуска. По отношению к прототипу у предлагаемого устройства имеются следующие отличительные признаки:

- устанавливаются электропривод и ролики на основании дозатора, с целью возможности передвижения дозатора с питателем, что позволит регулировать длину дуги кристаллизующегося металла;
- контроллер для управление электроприводом установленном на дозаторе в зависимости от температуры;
- датчик температуры установлен на неподвижном дугообразном сегмент так, чтобы точка измерения находилась максимально близко к входному сечению расплава под неподвижный дугообразный сегмент с матрицей;
- датчик температуры установлен на дозаторе;
- дугообразная направляющая закрепляется на корпусе П-образными крепежами с пружинами;
- в корпусе выполняются углубления для роликов.

На основании показаний сигналов температуры поступающих в контроллер с датчиков, регистрирующих изменение температуры в месте заливки и входа затвердевшего металла под неподвижный дугообразный сегмент, контроллер приводит в движение электропривод, установленный на основании дозатора. Направление вращения выбирается в соответствии со следующей зависимостью:

$$T = (t_{\text{текущая}} - (t_{\text{солидус}} - 2)).$$

При этом должны выполняться следующие условия:

- если  $T = 0$  – дозатор не движется;
- если  $T > 0$  необходимо увеличить длину дуги кристаллизующегося металла, путём движения дозатора в сторону от неподвижного дугообразного сегмента;
- если  $T < 0$  – необходимо уменьшить длину дуги кристаллизующегося металла, путём движения дозатора в сторону неподвижного дугообразного сегмента.

Оснащение установки для непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов методом Конформ устройством управления тепловым режимом, позволяет управлять тепловым режимом работы установки при холодном пуске, в период изменения температуры всей установки во времени, достичь стационарного теплового режима работы установки и повысить ее надежность.

Предложено также устройство терморегулирования для непрерывного литья и прессования алюминиевой проволоки методом конформ (рис. 5.11). Устройство включает дозатор 1, кристаллизатор 2, выполненный в виде диска с возможностью вращения в горизонтальной плоскости, имеющим кольцевую канавку 3 на верхней части диска, и сопрягающийся с ней неподвижный дугообразный сегмент заканчивающийся выступом 4, перекрывающим поперечное сечение кольцевой канавки 3 с матрицей 5. Герметичные секции, снабженные индивидуальными патрубками для подвода 9 и отвода 10 хладагента расположенными последовательно: в зоне



кристаллизации деформируемого металла 8 между дозатором 1 и дугообразным сегментом заканчивающимся выступом 4; по длине дугообразного сегмента заканчивающегося выступом 4 и в зоне охлаждения кристаллизатора 2 между дугообразным сегментом заканчивающимся выступом 4 и дозатором 1. На дугообразном сегменте заканчивающимся выступом 4, дозаторе 1 и выходных патрубках 10, установлены датчики температуры 11, соединённые с частотным преобразователем 6, который управляет частотой вращения электродвигателя 7.

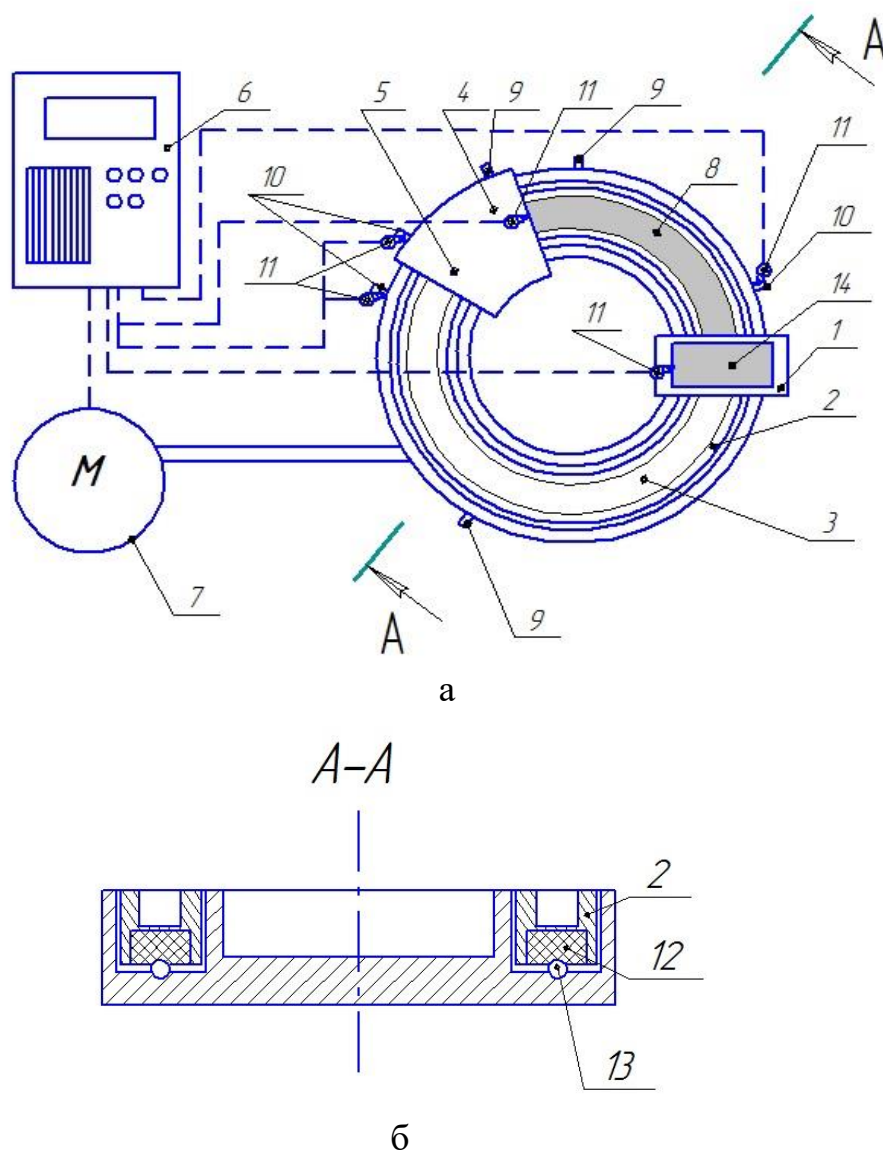


Рис. 5.11. Схема установки терморегулирования для непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов: а – общий вид; б – сечение установки

Во время работы предлагаемого устройства приводится во вращение кристаллизатор 2 и подается хладагент по подводящим патрубкам 9 с последующим его отводом через патрубки 10. Расплавленный металл 14 из дозатора 1 заливается в кольцевую канавку 3, выполненную на верхней части диска кристаллизатора 2. За время движения до дугообразного сегмента заканчивающегося выступом 4 расплавленный металл 14 охлаждается, кристаллизуется и принимает форму поперечного сечения канавки 3 и достигает дугообразный сегмент заканчивающийся выступом 4, где под действием активных сил контактного трения между стенками кольцевой канавки 3 и деформируемым металлом происходит его выдавливание в проволоку через матрицу 5. Скорость вращения кристаллизатора регулируется частотным преобразователем 6, за счет изменения частоты вращения электродвигателя 7, в зависимости от температуры на датчиках температуры 11. На (рис. 5.10, б) представлено расположение изоляционной вставки 12 для исключения перегрева подшипников 13, установленной в нижней части кристаллизатора 2. Таким образом, в заявляемом устройстве обеспечивается терморегулирование непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов.

Основной задачей данного устройства является достижение термостабильной работы установки. Конструктивные особенности данного устройства, обеспечивают термостабильную работу установки:

- установлен частотный преобразователь, что позволяет регулировать скорость вращения кристаллизатора и тем самым увеличить теплоотвод от расплава за счёт увеличения конвективной составляющей, либо снизить за счёт увеличения скорости вращения кристаллизатора, что позволяет регулировать температурный режим установки до выхода на стационарный тепловой режим;

- датчик температуры установлен на неподвижный дугообразный сегмент так, чтобы точка измерения находилась максимально близко к

входному сечению расплава под неподвижный дугообразный сегмент с матрицей;

– датчики температуры установлены на выходных патрубках, по которым отводится хладагент, что позволяет более точно управлять тепловыми условиями непрерывного процесса литья и прессования;

– датчик температуры установлен на дозаторе, через который подаётся расплав, что позволяет точно отследить температуру заливаемого металла в кристаллизатор;

– нижняя часть кристаллизатор, которая скользит по подшипникам, выполнена из изоляционного материала, что позволяет исключить перегрев подшипников, выгорание смазывающего материала и выход из строя установки.

Устройство для непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов методом Конформ, позволяет управлять тепловым режимом работы установки, достичь термостабильных условий работы и повысить ее надежность.

Таким образом, показана возможность оперативного управления тепловыми процессами в установках непрерывного совмещенного литья и прессования цветных металлов и сплавов, что подтверждается актом (см. Приложение Б).

## **5.5. Выводы по главе 5**

1. Разработана двухзонная система принудительного водяного охлаждения установки НСЛиП с ГК, позволяющая обеспечить стабилизацию температуры ее элементов за счет управления в переходном режиме величиной отвода избыточной теплоты из теплотехнических зон затвердевания металла и прессования.

2. Усовершенствована компьютерная модель теплообмена в установке НСЛиП с ГК с системой принудительного охлаждения ее элементов. Модель

дополнительно включает уравнения Навье-Стокса, сохранения массы и импульса, теплоотдачи в системе «вода-твердое тело» и позволяет учесть особенности конструкции системы охлаждения, а также движение, физические и режимные параметры охлаждающего агента.

3. В результате численного исследования определены температурно-временные зависимости и рациональные режимы системы водяного охлаждения элементов установки при непрерывном совмещенном литье-прессовании опытного алюминиевого сплава АК12 в нестационарных и установившихся условиях ее эксплуатации.

4. Показано, что при литье-прессовании необходимо обеспечить массовый расход воды в змеевике, расположенном на дугообразном сегменте, 0,13 кг/с, в кольцевых профилированных каналах, расположенных в корпусе (внешнем и внутреннем), – 0,06 кг/с, позволяющий, при обработке сплава АК12 с температурой заливки расплава  $t_p = 750$  °С, организовать отбор тепловой энергии в количестве 61,75 кВт.

5. Разработаны устройства для терморегулирования и управления тепловым режимом процесса непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов, позволяющие при совместной работе с водяной системой охлаждения вывести установку на стационарный тепловой режим без нарушения технологического процесса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате решения поставленных в диссертации задач были сделаны следующие основные выводы:

1. Проведены экспериментальные исследования тепловой работы опытно-промышленной установки непрерывного совмещенного литья и прессования цветных металлов и сплавов с карусельным горизонтальным кристаллизатором. Установлены температурно-временные зависимости литья-прессования алюминиевых сплавов различного состава в переходном тепловом режиме. Показано, что выход на стационарный тепловой режим сопровождается постепенным увеличением энтальпии металла с каждым оборотом кристаллизатора. При этом для обеспечения работоспособности установки в начальном режиме ее работы требуется дополнительный подвод теплоты к дозатору заливаемого расплава.

2. Разработана компьютерная модель нестационарного тепломассопереноса в установке непрерывного совмещенного литья и прессования цветных металлов с карусельным горизонтальным кристаллизатором, система уравнений и краевые условия в которой учитывают реальную геометрию элементов, систему их охлаждения, движение кристаллизатора и охлаждающего агента, образование теплоты при фазовом переходе и прессовании металла. Показано, что модель адекватно отражает результаты экспериментальных исследований.

Предложена программа инженерного экспресс-расчета на ЭВМ динамики угла затвердевания расплава и температуры по его сечению в ручье колеса-кристаллизатора установки Конформ-Кастэкс.

3. В результате расчетно-экспериментального исследования динамики затвердевания алюминиевых сплавов выявлены теплотехнические зоны, характеризующиеся различной степенью теплообмена в период от холодного пуска до момента стабилизации температуры всех ее элементов:

первые три зоны подвода теплоты, две остальные – отвода теплоты к элементам конструкции установки и в окружающую среду.

4. Установлены количественные температурно-временные зависимости при затвердевании алюминиевых расплавов различного состава в переходном тепловом режиме, заключающиеся в следующем:

- разогрев кристаллизатора увеличивает несимметричность температурного поля расплава, которое вблизи инструмента прессования (дугообразного сегмента) характеризуется сдвигом области с максимальной температурой к поверхности кристаллизатора;

- продолжительность переходного процесса и скорость затвердевания расплава зависят от температуры его перегрева и темпа разогрева кристаллизатора: увеличение перегрева заливаемого расплава на 10 °С приводит к возрастанию времени переходного процесса в среднем на 1 минуту; прогрев кристаллизатора увеличивает длину дуги затвердевания металла со скоростью 0,16 м в минуту (при температуре заливки расплава 750 °С);

- определен максимальный температурный предел перегрева алюминиевых расплавов 670-675 °С, при превышении которого металл попадает под инструмент прессования в жидкой фазе, что требует организации принудительного охлаждения элементов установки.

5. Предложено установить теплоизоляционный слой между кристаллизатором и подшипниками, обеспечивающий поддержание их рабочей температуры на уровне, не превышающем максимально допустимые значения.

6. Разработана система принудительного водяного охлаждения установки, позволяющая обеспечить стабилизацию температуры ее элементов за счет управления в переходном режиме величиной отвода избыточной теплоты из теплотехнических зон затвердевания металла и прессования.

7. На основе математического моделирования разработаны

рациональные режимы водяного охлаждения кристаллизатора и инструмента прессования при обработке алюминиевого сплава АК12. Показано, что при температуре заливки расплава 750 °С, требуется организовать суммарный отбор тепловой энергии от элементов установки в количестве 61,75 кВт.

8. Разработаны устройства для терморегулирования и управления тепловым режимом процесса непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов, позволяющие при совместной работе с водяной системой охлаждения вывести установку на стационарный тепловой режим без нарушения технологического процесса.

9. Научные и практические результаты работы используются в учебном процессе Сибирского федерального университета при подготовке студентов по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника».

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бровман, М. Я. Непрерывная разливка металлов / М. Я. Бровман. – М.: Экомет, 2007. – 484 с.
2. Сидельников, С.Б. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Н.Н. Загиров. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 344 с.
3. Бровко, А.В. Проблемы автоматической сварки волноводов радиолокационных станций / А.В. Бровко. // Известия высших учебных заведений: Машиностроение. – 2013. – № 1. – С. 50–54.
4. Горохов, Ю.В. Основы проектирования процессов непрерывного прессования металлов: автореф. дис. ... док. техн. наук. – Красноярск: СФУ, 2013. – 30 с.
5. Крюков, И. Ю. Элементы устройства горизонтальной машины полунепрерывного литья заготовок для обеспечения эффективной разливки цветных металлов и сплавов / И. Ю. Крюков, С. М. Горбатюк, А. Г. Радюк, А. Ю. Зарапин // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2017. – №1(8). – С. 3–8.
6. Основы производства и обработки металлов. Версия 1.0 [Электронный ресурс] : конспект лекций / А. И. Булгакова, И. Л. Константинов, Т. Р. Гильманшина и др. – Электрон. дан. (4 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – 1 электрон. опт. диск (DVD).
7. Калягин, Ю.А. Тепловые процессы при непрерывной разливке стали и в оборудовании машин непрерывного литья заготовок: автореф. дис. ... док. техн. наук. – Череповец: ЧГУ, 2005. – 30 с.
8. Минаев, А.А. Совмещенные металлургические процессы / А. А. Минаев. – Донецк : Технопарк ДонГТУ. УНИТЕХ, 2008. – 552 с.
9. Тимошпольский, В. И. Разработка и выбор методов совершенствования технологии непрерывной разливки и конструктивных параметров современных МНЛЗ на базе математического моделирования / В.



И. Тимошпольский, С. М. Кабишов, И. А. Трусова, А. В. Маточкин // *Литьё и металлургия*. – 2010. – №1(54) – С. 26 – 32.

10. Прессование алюминиевых сплавов: моделирование и управление тепловыми условиями: монография / Н.Н. Довженко, С.В. [и др.]. – Красноярск: Сиб. федер. ун.-т, 2009. – 256 с.

11. Основы проектирования процессов непрерывного прессования металлов: монография / Ю.В. Горохов [и др.]. – Красноярск: Сиб. федер. ун.-т, 2013. - 224 с.

12. Потапов, И.Н. Методы непрерывного прессования / И.Н. Потапов, Д.Б. Ефремов, П.П. Финагин [и др.]. // *Цветные металлы*. – 1987. – №3 – С. 85–88.

13. Непрерывное прессование со сваркой алюминиевых сплавов / В.Н. Корнилов. – Красноярск : Изд-во пед. института, 1993. – 216 с.

14. Бережной, В.Л. Российская технология и производство пресс-изделий из алюминиевых сплавов: между прошлым и будущим / В.Л. Бережной // *Технология легких сплавов*. – 2004. – № 3. – С. 49–54.

15. Бережной, В.Л. Комплексы и линии для прессования легких сплавов / В.Л. Бережной // *Энциклопедия «Машиностроение»*, том IV – М.: Машиностроение, 2005. – С. 488–494.

16. Федоров, М.В. Алюминий и алюминиевые полуфабрикаты на внутреннем рынке / М.В. Федоров // *Металлоснабжение и сбыт*. – 2002. – июнь – С. 86–91.

17. Космацкий, Я. И. Математическое моделирование совмещённого процесса разлива и бокового прессования / Я. И. Космацкий, Н. В. Фокин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. – 2015. – №1(15). – С. 29-33

18. Green, D. Conform a new method for the continuous forming of metals / D. Green // *Brit. Ind.* – 1969. - 10 – № 6. – P. 18–19.

19. Green, D. The continuous extrusion forming of wire sections / D. Green // *TRG Report*. – 1972. – July.

20. BWE Ltd (formerly Babcock Wire Equipment) [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.bwe.co.uk>
21. RAUTOMEAD [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.rautomead.co.uk/index.php>
22. Фахретдинова, Э. И. Исследование деформационных параметров и особенностей микроструктуры алюминиевого сплава при реализации процесса мульти-РКУП-Конформ / Э. И. Фахретдинова, Р. Ф. Галлямова, Г. И. Рааб // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2016. – №2(7). – С. 18–23.
23. Райнхельт, В. Развитие новых структур в черной металлургии на фоне третьей промышленной революции: пер. с нем. / В. Райнхельт // Черная металлы. – 1985. – № 12. – С. 3–8.
24. Optimization of mold inverse oscillation control parameters in continuous casting process / Liu J., Liu C. // Materials and manufacturing processes. 2015. Vol. 30, No 4. P. 563 – 568.
25. Патент США № 2710433. Continuous metal casting machine. Apl. Pario Properzi. Заявл. 25.02.1949. Оpubл. 14.06.1955. НКИ 22 – 57.4.
26. Корнилов, В.Н. Новые разработки в области непрерывного прессования / В.Н. Корнилов // Технология легких сплавов. – 1990. – № 11. – С. 60–62.
27. Сергеев, В.М. Получение пресс-изделий непрерывным литьем-прессованием / В.М. Сергеев, Ю.В. Горохов, В.Г. Шеркунов [и др.] // Цветные металлы. – 1988. – № 12. – С. 65–67.
28. Горохов, Ю.В. Основы проектирования конструктивных параметров установки непрерывного литья-прессования металлов / Ю.В. Горохов, И.В. Солопко, И.Л. Константинов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2009. – № 3. – С. 20–23.
29. Пат. 111783 Российская Федерация, МКП В21С 23/08. Установка для непрерывного литья-прессования металлов / Ю.В. Горохов, И.В. Солопко, В.П. Суслов [и др.]; опубл. 27.12.2011, Бюл. № 36.

30. Сергеев, В.М. Непрерывное литье-прессование цветных металлов / В.М. Сергеев, Ю.В. Горохов, В.В. Соболев [и др.]. – М.: Металлургия, 1990. – 85 с.
31. Пат. 111659 Российская Федерация, МПК В22D 11/06, В21С 23/00. Устройство для непрерывного литья и прессования металла методом конформ / Ю.В. Горохов, С.В. Беляев, В.Г. Шеркунов [и др.]; опубл. 27.08.2012, Бюл. № 24.
32. Горбунов, Ю.А. Состояние и перспективы развития технологий производства деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов на заводах РФ // Цветные металлы-2010: сб. науч. статей. Красноярск: Изд-во «Версо». – 2010. – С. 656–662.
33. Бережной, В.Л. Базовые технологии и оборудование будущего в производстве пресс-изделий // Технология легких сплавов. – 2006. – № 1–2. – С. 52–61.
34. Kellock B. A major step forward in aluminium extrusion // Mach. and Prod. 1982. No. 6 (140). P. 58–59.
35. Bryant A., Dixon W. Isothermal Extrusion // Light Metal Age. 1999. No. 3–4. P. 8–36.
36. Grzyb R., Misiolek Z. The experimental investigations on the Force Parameters and metal flow in the combined process of Rolling and Extrusion // Archiwum Hutnictwa. 1983. No. 3. Vol. 28. P. 321–340.
37. Прессование с активным действием сил трения / В. Л. Бережной, В. Н. Щерба, А. И. Батулин. – М. : Металлургия, 1988. – 296 с.
38. Сидельников, С. Б. Разработка новой технологии комбинированной обработки силуминов / С.Б. Сидельников [и др.] // Вестник СибГАУ ; Красноярск. – 2006. – Вып. 5 (12). – С. 233 –235.
39. Патент на полезную модель № 111784 Российская Федерация, МПК В22D 11/06, В21С 23/00. Устройство для охлаждения установки непрерывного литья - прессования металлов / Ю.В. Горохов, И.В. Солопко, Н.А. Нестеров; опубл. 27.12.2011, Бюл. № 36.

40. Беляев, С.В., Довженко И.Н, Соколов Р.Е. Конспект лекций «Технология прессования», Красноярск: ИПК СФУ. – 2007. – 310 с.

41. Авдулов, А.А. Разработка технологии производства проволоки из специальных алюминиевых сплавов на основе способа литья в электромагнитный кристаллизатор и непрерывного процесса прессования способом конформ / А.А. Авдулов, Н.В. Сергеев, И.С. Гудков, В.Н. Тимофеев, Ю.В. Горохов, Ю.С. Авдулова // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2017. – Т. 10, №1. – С. 85-94.

42. Сидельников, С.Б. Инновационные совмещенные технологии при обработке металлов / С. Б. Сидельников, Ю. В. Горохов, С. В. Беляев // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2015. – Т. 8, №2. – С. 185–191.

43. Беляев, С.В. Повышение эффективности производства профилей из алюминиевых сплавов на основе управления тепловыми условиями процесса прессования / С.В. Беляев, Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, А.С. Пещанский, П.О. Широков, А.Л. Киселёв // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2009. – Т. 4, – № 2. – С. 418-426.

44. Губанов, И.Ю. Особенности моделирования процесса полунепрерывного прессования алюминиевых сплавов / И.Ю. Губанов, С.В. Беляев, П.О. Широков, А.В. Салатов, И.Ю. Маслов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнёва. – 2010. – С. 35–38.

45. Шеркунов, В.Г. Использование способа «конформ» для переработки стружки из алюминиевых сплавов / В.Г. Шеркунов, Ю.В. Горохов, И.Л. Константинов, Е.В. Иванов, В.П. Катрюк // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2015. – №3 – С.60 – 63.

46. Разработка инновационной технологии литья - непрерывного прессования волноводов и сварочной проволоки из алюминиевых сплавов

для космической техники: отчёт о НИР (закл.) / Сибирский федеральный университет; рук. Беляев С. В.; исполн.: Горохов Ю. В., Губанов И. Ю., Усков И. В., Гильманшина Т. Р., Лыткина С. И., Косович А. А., Богданов Д. В. – Красноярск, 2014. – 135 с.

47. Кабаков, З.К. Аналитическое решение задачи затвердевания плоской заготовки на горизонтальной установке непрерывной разливки металла / З.К. Кабаков, Д.И. Бородин, И.Ю. Мазина // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2011. – Т.2, №4–34. – С. 8–11.

48. Лукин, С. В. Алгоритм оптимизации режимов охлаждения термостатирования и нагрева слябов на линии «МНЛЗ – нагревательная печь» / С. В. Лукин, А. А. Кочкин, А. Н. Кибардин, Ю. В. Антонова, В. В. Мухин, В. И. Игонин // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2017. – №2 (77). – С. 23–30.

49. Лукин, С. В. Алгоритм оценки параметров теплового состояния сляба на линии «МНЛЗ – термостат – нагревательная печь» / С. В. Лукин, А. Н. Кибардин, Ю. В. Антонова // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2017. – №5 (80). – С. 25–36.

50. Лукин, С. В. Совершенствование режимов затвердевания, охлаждения и нагрева стальных слитков с использованием моделирования / С. В. Лукин, Н. И. Шестаков, Ю. В. Антонова // Metallurg. – 2014. – №9. – С. 105–108

51. Лукин, С. В. Алгоритм оптимизации режимов затвердевания, охлаждения и нагрева стальных слитков / С. В. Лукин, Н. И. Шестаков, Ю. В. Антонова, В. В. Мухин // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2014. – №3 (56). – С. 13–17

52. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152с.

53. Самойлович, Ю.А. Формирование слитка / Ю.А. Самойлович. – М.: Металлургия, 1977. – 158 с.
54. Modeling of the Solidification Process in a Continuous Casting Installation for Steel Slabs / Marcial Gonzalez, Marcela B. Goldschmit, Andrea P. Assanelli, Elena Fernández Berdaguer, and Eduardo N. Dvorkin // Metallurgical and Materials Transactions. 2003. Vol. 34B. P. 455–473.
55. Сулимцев, И.И. Исследование диффузионного переохлаждения в двухфазной зоне затвердевающих бинарных сплавов и его роли в структурообразовании : дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 1977. – 163 с.
56. Сулимцев, И.И. Метод изучения структурообразования металла с целью получения информации для управления процессом затвердевания изделий, кристаллизующихся в условиях двухфазной зоны / И.И. Сулимцев // Известия МГТУ «МАМИ». – 2009. – №2(8). – С. 160–167.
57. Одинокоев, В.И. Технология получения металлоизделий на установке горизонтального литья и деформации металла / В.И. Одинокоев, В.В. Черномасов, Н.С. Ловизин, В.В. Стулов, С.Ю. Складар // Металлург. – 2009. – № 7. – С. 47–49.
58. Черномас, В.В. Исследование процесса изготовления металлоизделий совмещенным методом литья и штамповки / В. В. Черномас // Обработка металлов. – 2011. – № 3. – С. 3–10.
59. Черномас, В.В. Критерии устойчивости технологического процесса получения металлоизделий на установке горизонтального литья и деформации металла / В. В. Черномас, Н. С. Ловизин, А. А. Соснин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – М.: Наука. – 2012. – № 2. – С. 71–77.
60. Черномас, В.В. Исследование теплового режима кристаллизатора установки горизонтального литья и деформации металла при изготовлении металлоизделий из алюминиевых сплавов / В. В. Черномас, Н. С. Ловизин, А. А. Соснин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: КШП ОМД. – 2011. – № 10. – С. 39–45

61. Черномас, В.В. Исследование распределения температур на поверхности контакта металлоизделия с верхней и нижней стенками кристаллизатора установки горизонтального литья и деформации металла вблизи его продольной плоскости симметрии / В. В. Черномас, Н. С. Ловизин, А. А. Соснин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – М.: КШП ОМД. – 2011. – № 12. – С. 21–25.

62. Черномас, В. В. Моделирование процесса деформации при получении алюминиевой полосы совмещённым методом литья и деформации металла / В. В. Черномас, С. Н. Химухин, С. Р. Саликов, А. В. Коновалов // Технология. Обработка металлов. – 2012. – № 3(56). – С. 5–11.

63. Пат. 2401175 Российская Федерация, МПК В22D 11/06, В22D 11/07. Устройство для непрерывного горизонтального литья и деформации металла / В. В. Черномасов, В. И. Одинокоев, С. Ю. Складар; опубл. 10.10.2010. Бюл. № 28

64. Будилов, И. Н. Моделирование образования алюминиевого слитка в процессе полунепрерывного литья / И. Н. Будилов, Ю. В. Лукашук, С. Ю. Лукашук // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15, №1 (41). – С. 87 – 94.

65. Скуратов, А. П. Компьютерное моделирование и оптимизация процесса литья слитков платины / А.П. Скуратов, Д. И. Махов, Е. А. Павлов // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2014. – Т. 1, №7. – С. 96–102.

66. Фомина, Е. Е. Моделирование и исследование процесса затвердевания заготовок при дискретно-непрерывном литье металлов / Е. Е. Фомина, Н. К. Жиганов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2009. – Т. 1, №1. – С. 67–75.

67. Гончаров, В. А. Модель неравновесной кристаллизации для численного решения задачи роста полупроводниковых кристаллов из расплавов / Гончаров В. А., Азанова И. В., Васекин Б. В. // Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА. – 2010. – №5(85). – С. 5–14.

68. Гинкин, В. П. Численное моделирование процесса тепломассопереноса с позиции кластерной модели строения расплава / В. П. Гинкин, М. А. Забудько, А. В. Картавых [и др.] // Поверхность. – 2004. – №6 – С. 93–100.
69. Гинкин, В. П. Неравновесная модель для расчёта процесса кристаллизации двухкомпонентных расплавов / В. П. Гинкин, С. М. Ганина, К. Г. Чернов // ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2011. – №4. – С. 58–65.
70. Гинкин, В. П. Математическая модель и метод расчёта кристаллизации двухкомпонентных расплавов / В. П. Гинкин, С. М. Ганина, А. В. Картавых, К. Г. Чернов // Сборник научных статей. Современная наука. – 2010. – №2(4). – С. 48–55.
71. Бажин, В. Ю. Компьютерное моделирование процесса бесслитковой прокатки / В. Ю. Бажин, А. Г. Бабенко // Расплавы. – 2008. – №5. – С. 62–68.
72. Шемякин, Ю. В. Разработка численной модели процесса прессования цилиндрических заготовок из алюминиевого сплава с целью использования в оптимизационных процедурах / Ю. В. Шемякин // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2013. – №10. – С. 62–65.
73. Крючков, Д. И. Моделирование и выбор оптимальной формы матрицы на основе оценки поврежденности для прессования биметаллических проводников / Д. И. Крючков, А. Г. Залазинский // Фундаментальные исследования. Технические науки. – 2012. – №11. – С. 619–624.
74. Кванин, В. Л. Математическая модель температурного режима при радиальном СВС-прессовании цилиндрических заготовок / В.Л. Кванин, Н.Т. Балихина, П.И. Краснощеков, В.П. Радченко, А.Ф. Федотов // Вестник Самар. Гос. техн. ун-та. сер. Физико-математические науки. – 2005. – №34. – С. 50–59.



75. Белов, В. Г. Критериальная математическая модель процессов прессования изделий из сплавов на основе меди / В. Г. Белов // Вестник МГУПИ. – 2014. – №51. – С. 45–53.
76. Кокорин, В. Н. Математическая модель прессования порошков на основе железа в присутствии жидкой фазы / В. Н. Кокорин, В. И. Филимонов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 4, №1(36). – С. 32–35.
77. Акимов, А. А. Математическая модель процесса прессования порошкообразных энергетических материалов / А. А. Акимов, М. С. Воротилин, Д. Л. Голуб // Гетеромагнитная микроэлектроника. – 2013. – №14. – С. 106–122.
78. Выдрин, А. В. Математическое моделирование процесса прессования труб переменного сечения / А. В. Выдрин, Я. И. Космацкий, Б. В. Баричко // Вестник ЮУрГУ. – 2012. – №15. – С. 122–125.
79. Малюков, С. П. Математическая модель прессования горячепрессованных ферритов / С. П. Малюков, С. А. Обжелянский // Известия ТРТУ. – 2001. – №4(22). – С. 212–216.
80. Першин, Д. С. Численное исследование кинематики процесса равноканального углового прессования в двумерной и трёхмерной постановках / Д. С. Першин, Н. В. Овчинникова // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – №4(17). – С. 66–70.
81. Карташов, В. В. Математическая модель горячего прессования тугоплавких материалов в установках с комбинированной системой нагрева / В. В. Карташов, Е. П. Лобанов, А. Р. Бекетов, В. Б. Грахов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2006. – №11. – С. 44–51.
82. Барков, Л. А. Компьютерное моделирование процесса горячего изостатического прессования пористых заготовок / Л. А. Барков, П. А. Ческидов, М. Н. Самодурова, Ю. С. Латфулина // Вестник ЮУрГУ. Серия Металлургия. – 2016. – Т. 16, №3. – С. 122–126.

83. Лехов, О. С. Установка совмещённого процесса непрерывного литья и деформации для производства биметаллических полос / Лехов О. С., Лисин И. В. // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2015. – №6. – С. 30–35.
84. Лехов, О. С. Совмещённые процессы непрерывного литья и деформации для производства проката / О. С. Лехов, Ю. С. Комратов. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2009. – 411 с.
85. Пат. №2077407 Российская Федерация, МПК В22D 11/00. Способ непрерывного литья заготовок и устройство для его осуществления / О. С. Лехов; опубл. 20.04.1997, Бюл. №5.
86. Пат. №2064364 Российская федерация, МПК В22D11/00. Способ получения биметаллической полосы / О. С. Лехов; опубл 27.07.1996, Бюл. №4.
87. Лехов О.С. Исследование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения листа из алюминия / О. С. Лехов, Ю. С. Комратов, М. Ю. Туев // Производство проката. – 2009. – №6. – С. 41–43.
88. Космацкий, Я. И. Математическое моделирование совмещённого процесса разлива и бокового прессования / Я. И. Космацкий, Н. В. Фокин // Вестник ЮУрГУ. Серия Металлургия. – 2015. – Т. 15, №1. – С. 29–33.
89. Горохов, Ю. В. Методология исследования совмещённого процесса непрерывного литья и прессования металлов / Ю. В. Горохов, В. Г. Шеркунов, И. Л. Константинов // Вестник ЮУрГУ. – 2015. – Т. 15. - №2. – С. 82–88.
90. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. - М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
91. Филиппова, М. В. Разработка и внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки металлов давлением: Монография / М. В. Филиппова, В. Н. Перетягко, М. В. Темлянцев; М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВПО «Сиб. гос. индустр. ун-т». – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2016. – 269 с.

92. ESI Group [Электронный ресурс]: Режим доступа: [www.esi-group.com/ru](http://www.esi-group.com/ru)
93. Жидков, А.В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования / А. В. Жидков – Нижний Новгород, 2006. – 115 с.
94. Пат. 102550 Российская Федерация, МКП В21С 23/08. Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла / С.В. Беляев, С.Б. Сидельников, Ю.В. Горохов [и др.]; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 7.
95. Пат. 146555 Российская Федерация, МКП В22D 11/06. Установка для непрерывного литья и прессования металла методом конформ / Ю.В. Горохов, С.В. Беляев, В.Г. Шеркунов [и др.]; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 28.
96. Трёмбовля, В. И. Теплотехнические испытания котельных установок / В. И. Трёмбовля, Е. Д. Фингер, А. А. Авдеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 416с.
97. Линчевский, Б. В. Техника металлургического эксперимента / Б. В. Линчевский. – М. : Металлургия, 1967. – 344с.
98. Stebunov, S. Development and industrial verification of Q-Form-Extrusion program for simulation profile extrusion/ S. Stebunov, A. Lishnij, N. Biba // Proceeding of International Conference of Extrusion and Benchmark, Dortmund, Germany. – 2009. – P. 41–42.
99. Скуратов, А.П. Исследование тепловой работы установки непрерывного литья и прессования алюминия в переходном режиме / А.П. Скуратов, А.С. Потапенко, Ю.В. Горохов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – Т. 10. – № 3. – С. 337–345.
100. Скуратов, А.П. Компьютерная модель теплообмена в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов / А.П. Скуратов, А.С. Потапенко // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – Т. 10. – № 8. – С. 1019–1030.

101. Потапенко, А.С. Динамика затвердевания алюминиевого сплава при нестационарном тепловом режиме установки непрерывного литья и прессования/ А.С. Потапенко, А.П. Скуратов, Ю.В. Горохов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 7. – С. 109–118.
102. Потапенко, А.С. Численное исследование теплообмена в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов с водяной системой охлаждения / А.С. Потапенко, А.П. Скуратов, Ю.В. Горохов, Н. П. Попиякова // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 7. – С. 109–118.
103. Gorokhov, Y.V. Analysis of combined metal casting the thermal conditions: the pressing process during conform installation / Y.V. Gorokhov, A.P. Skuratov , S.V. Belyaev, I.Y. Gubanov, I.V. Uskov, E.M. Lesiv, A.G. Ivanov, V.I. Kirko, N.P. Koptseva and A.S. Potapenko// ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2017. – Vol. 12. – No.16. – PP. 4742–4746.
104. Рекомендации по использованию сеточного препроцессора Ansys Meshing [Электронный ресурс] // ANSYS Advantage. Русская редакция: инж.-техн. журн. – 2014. – №20. – Режим доступа: <http://www.ansysadvantage.ru>
105. Молчанов, А. М. Построение сеток в задачах авиационной и космической техники / А. М. Молчанов, М. А. Щербаков, Д. С. Янышев, М. Ю. Куприков, Л. В. Быков; МАИ – М., 2013. – 260с.
106. Самойлович, Ю.А. Стальной слиток: В 3 т. Т. 1. Управление кристаллической структурой / Под общ.ред. В.И. Тимошпольского, Ю.А. Самойловича // Ю.А. Самойлович, В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова [и др.]. – Мн.: Беларуская навука, 2000. – 583 с.
107. Лисиенко, В.Г. Теплофизика металлургических процессов / В.Г. Лисиенко, В.И. Лобанов, Б.И. Китаев. – М.: Металлургия, 1982. – 240 с.
108. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева, - М.: Энергия, 1977. – 344с.

109. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат, 1979. – 415 с.
110. Жиганов, Н.К. Моделирование процессов непрерывного литья цветных металлов и их сплавов / Н. К. Жиганов, И. Н. Вольнов, Е. Е. Фомина. – Тверь: ТГТУ, 2007. – 224 с.
111. Борисов, В. Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. – М.: Metallurgy, 1987. – 224 с.
112. Александров, Д. В. Задача Стефана затвердевания трехкомпонентных систем при наличии движущихся областей фазового перехода / Д. В. Александров, А. А. Иванов. – ЖЭТФ. – 2009. – Т.135, №5. – С. 942–950.
113. A thermodynamically consistent model of a mushy zone / Hills R. N., Loper D. E., Roberts P. H. // Q. J. Mech. Appl. Math., 1983. No 36. P. 505–539.
114. Semi-solid forming – the process and the pass forward / Flemings M. C. // Metallurgical Science and Technology. 2000. Vol. 18. No 2. P. 3–7.
115. Semisolid metal processing / Fan Z. // International Materials Reviews. 2002. Vol. 47. No 2. P. 49–85.
116. Development of a semi-solid processing technique for aluminium casting application / Wannasin J., Thanabumrungskul S. // Songklana Journal of Science and Technology. 2008. Vol. 30. No 2. P. 215–220.
117. Slurry based semi-solid die casting / Rice C. S., Mendes P. F. // Advanced materials and processing. 2001. Oct. P. 49–52
118. Two-dimensional thermomechanical analysis of continuous casting process / M. Janik, H. Dyja, S. Berski, G. Banaszek // AMPT, Ireland, 2003.
119. Thermo-mechanical models of steel solidification based on two elastic visco-plastic constitutive laws / Koric, S. and B.G. Thomas // Journal of Materials Processing Technology. 2008. Vol. 197 No(1–3). p. 408-418.
120. Thermal Analysis During Continuous Casting Process Using Effective Heat Capacity Method / M. Ruhul Amin // Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 14, No. 2, April–June 2000, pp. 170 – 176.

121. Numerical simulation of temperature distribution in a continuous casting process for the production of AlSn(Cu) alloys / Erhard Kaschnitz, Mykola Romansky, Robert Mergen // High Temperatures – High Pressures. 2002. Vol. 34. pp. 699–704.
122. The copper plate's thermal field analysis of a continuous caster / J. Yang, M. Zhao, J. Zhang // Heavy Mach. 2003. Vol. 6. pp. 12–14.
123. X. Peng, J. Zhou, Y. Qin, Improvement of the temperature distribution in continuous casting moulds through the rearrangement of the cooling water slots, Journal of Materials Processing Technology. 2005. Vol. 167. pp. 508–514.
124. Mathematical modelling and experimental measurements on the horizontal continuous casting process / F. Chabchoub // M.Ap.Sc. thesis, University of Toronto. Canada (1992)
125. Thermal analysis of piston casting using 3-D finite element method / D. Robinson, R. Palaninathan // Finite Elements in Analysis and Design. 2001. Vol. 37. pp. 85 – 95.
126. Hot profile extrusion of AA-6060 aluminum chips / Tekkaya A. E. // Journal of Materials Processing Technology. 2009. Vol. 209, Issue 7. P. 3343–3350.
127. An approach to simulate shape dictortion due to cooling in aluminum extrusion / Bikass S., Andersson B, Ma X. // Key engineering materials. 2010. Vol. 424, P. 65–70.
128. Study of flow balance and temperature evolution over multiple aluminum extrusion press cycles with hyperxtrude 9,0 / Bastani A.F., Aukrust T. Skauvik I. // Key engineering materials. 2010. Vol. 424. P. 257–264.
129. George E. Totten. Handbook of Aluminum. Physical metallurgy and processes / George E. Totten., D. Scott MacKenzie. - N. Y.: Marcel Decker. Inc, 2003. Vol. 1, P. 1309
130. Евдокимов, И. Е. Моделирование излучения струи горячих газов в Ansys CFX / Евдокимов И. Е., Сорокин А. А. // Вестник двигателестроения. – 2010. – №2. – С. 29–33.

131. Designing and continuous extrusion forming of Al–Mg–Si contact lines for electric railway / Popescu I.N., Bratu V., Rosso M., Popescu C., Stoian E.V. // *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2013. Vol. 15 , P. 712–717.
132. Effect of process parameters on sheath forming of continuous extrusion sheathing of aluminum / Zhao Y., Song B.–Y., Yun X.–B., Pei J.–Y., Jia C.–B., Yan Z.–Y. // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*. 2012. Vol. 22 (12). P. 3073–3080.
133. Deformation structures and strengthening mechanisms in an Al–Mg–Sc–Zr alloy / S. Malopheyev, V. Kulitskiy, R. Kaibyshev // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 698. P. 957–966.
134. Development of a high temperature high strength Al alloy by addition of small amounts of Sc and Mg to 2219 alloy / S. Mondol, T. Alamb, R. Banerjee, S. Kumar, K. Chattopadhyay // *Materials Science & Engineering*. 2017. Vol. 687. P. 221–231
135. Structure and properties of aluminium – magnesium casting alloys after heat treatment / Krol M., Tanski T., Snopinski P., Tomiczek B // *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2017. Vol. 127. No. 1. P. 299–308.
136. Microstructure and mechanical properties of semi – continuous cast MG–GD–Y–ZR alloy / Wan Y.C., Xiao H.C., Jiang S.N., Tang B., Liu C.M., Chen Z.Y., Lu L.W. // *Materials science and engineering*. 2014. Vol. 617. No. 1. P. 243–248.
137. Optimization of mold inverse oscillation control parameters in continuous casting process / Liu J., Liu C. // *Materials and manufacturing processes*. 2015. Vol. 30. No. 4. P. 563–568.
138. Numerical simulation of continuous extrusion extending forming under the large expansion ratio for copper strip / Yun X.–B., Yao M.–L., Wu Y., Song B.–Y. // *Applied Mechanics and Materials*. 2011. Vols. 80-81. P. 91–95.
139. Analysis of shear deformation scheme efficiency in plastic structure formation processes / Raab G.I., Raab A.G., Shibakov V.G. // *Metalurgija*. 2015.

Vol. 54. No. 2. P. 423–425.

140. Semi-solid continuous casting–extrusion of AA6201 feed rods / Zhou T.G., Jiang Z.Y., Wen J.L., Li H., Tieu A.K. // Mater. Sci. Eng. 2012. Vol. 8. P. 108–114.

141. Continuous Rotary Extrusion (CRE) of Flat Sections from 6063 Alloy / Mitka M., Gawlik M., Bigaj M., Szymanski W. // Key Engineering Materials. 2015. Vol. 641. P. 183–189.

142. Пат. 2657396 Российская Федерация, МПК В22D 11/06, В21С 23/00. Устройство управления тепловым режимом непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов / А. П. Скуратов, Ю. В. Горохов, А. С. Потапенко, С. В. Беляев [и др.]; опубл. 13.06.2018, Бюл. №17.

143. Потапенко А. С., Скуратов А. П., Горохов Ю. В., Губанов И. Ю. Расчёт температурных полей при кристаллизации расплава металла в ручье колеса установки Конформ-Кастекс: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614574 от 19.04.2017.



## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Результаты экспериментального исследования

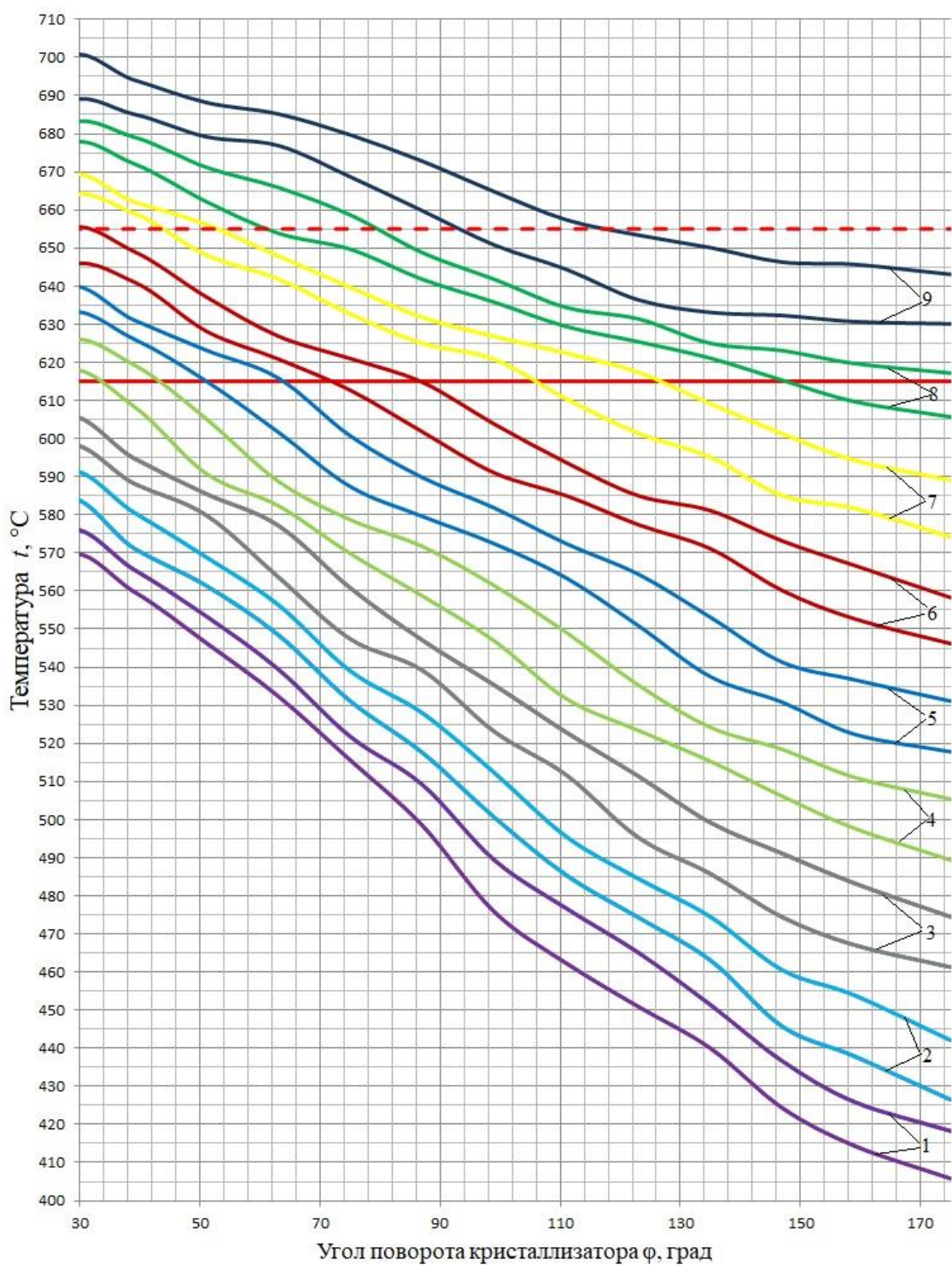


Рис. А.1. Динамика изменения температуры затвердевающего расплава АД31 при различном угле поворота кристаллизатора: кривые 1–9 соответственно 1–9 оборот кристаллизатора

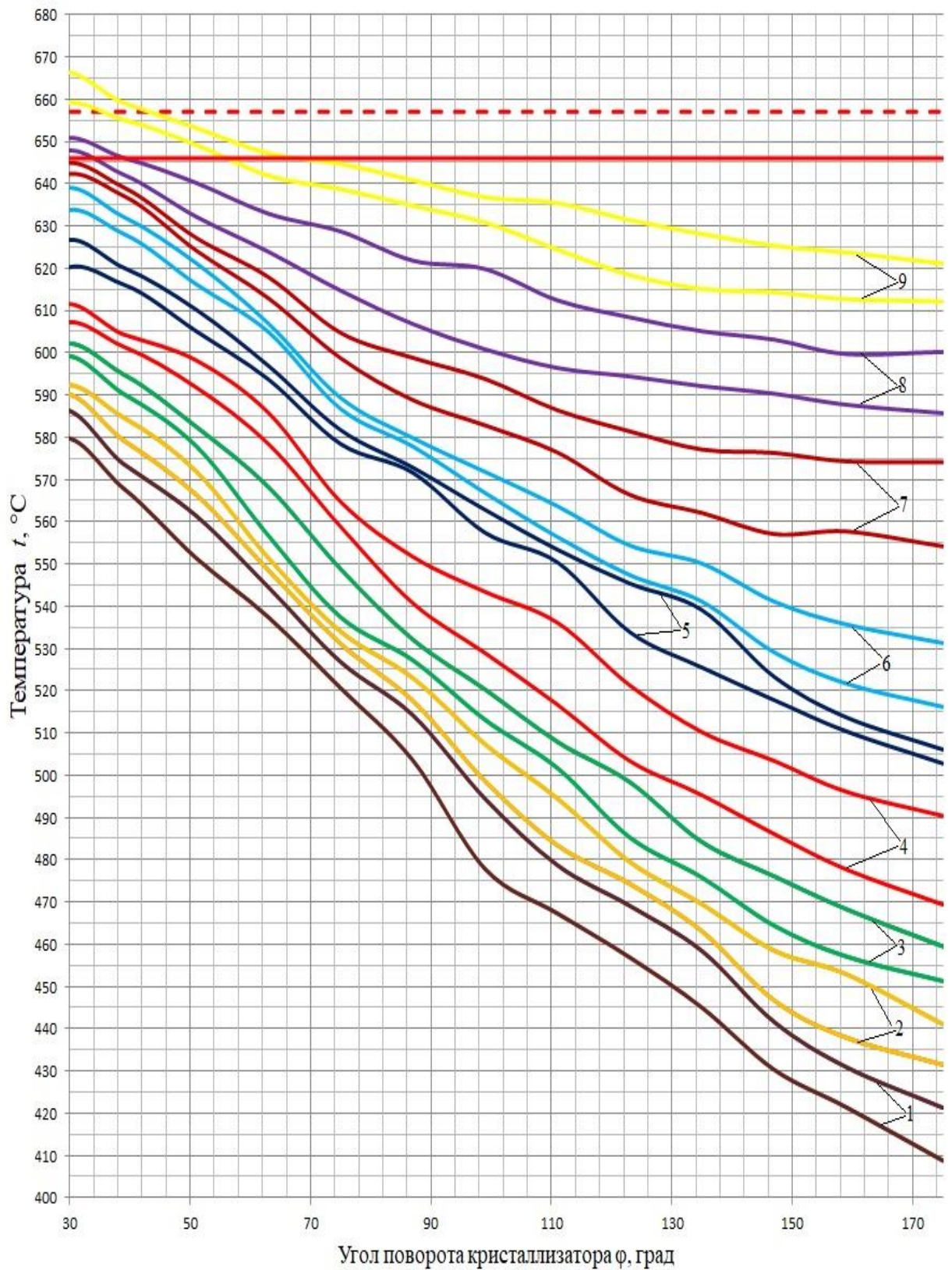


Рис. А.2. Динамика изменения температуры затвердевающего расплава АД0 при различном угле поворота кристаллизатора: линии 1–9 соответственно 1–9 оборот кристаллизатора

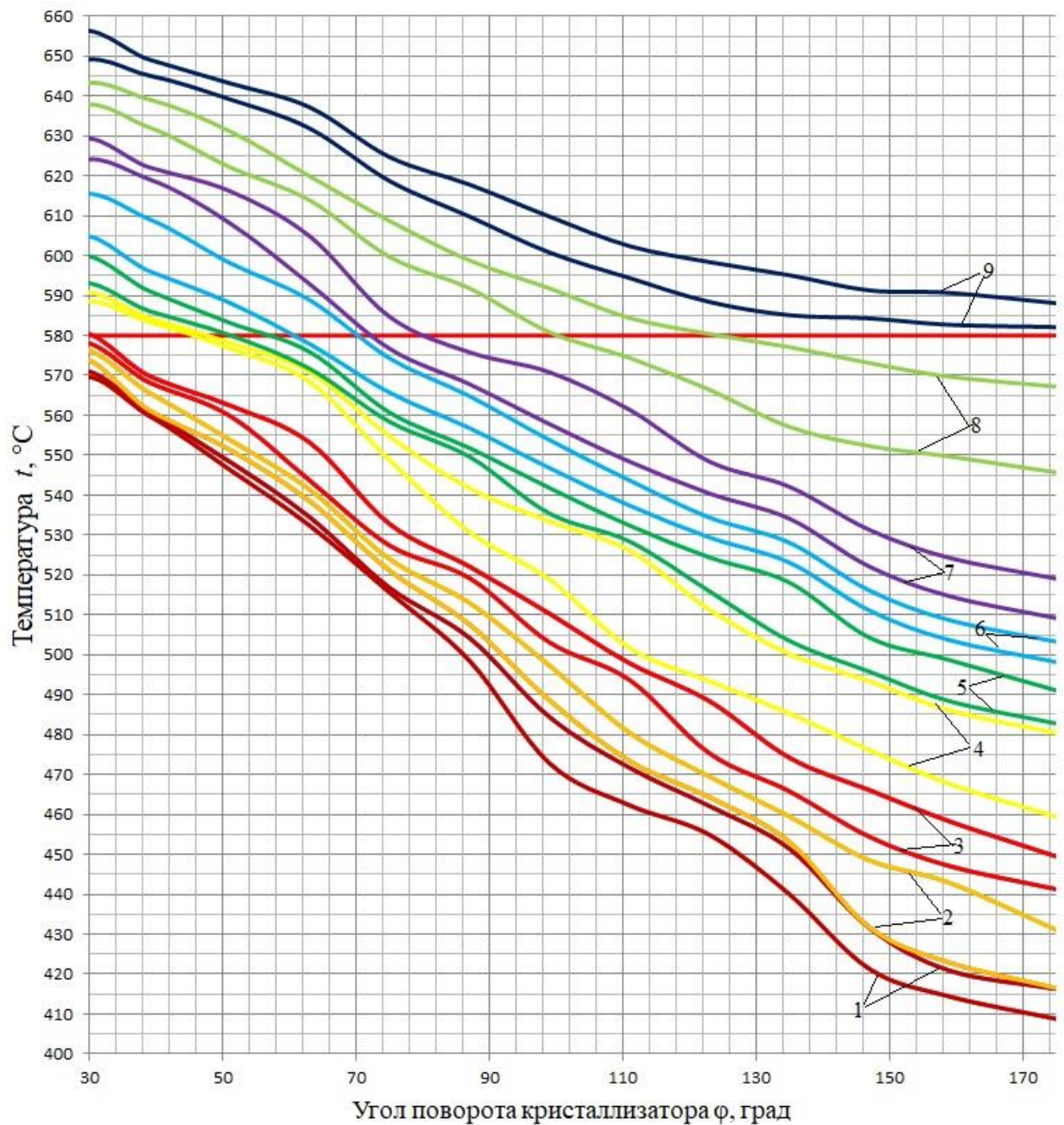


Рис. А.3. Динамика изменения температуры затвердевающего расплава АК12 при различном угле поворота кристаллизатора: линии 1–9 соответственно 1–9 оборот кристаллизатора

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Акты об использовании результатов работы

УТВЕРЖДАЮ:  
Ректор ФГАОУ ВО «Сибирский  
федеральный университет»  
В.И. Колмаков  
«28» июля 2018 г.

УТВЕРЖДАЮ:  
Директор ООО «Завод  
современных материалов»  
В.И. Зыков  
«29» июля 2018 г.

#### АКТ

опытно-промышленной апробации результатов исследования по совершенствованию управления тепловыми процессами в установке непрерывного совмещенного литья и прессования цветных металлов

Настоящим актом подтверждается, что опытно-промышленная апробация результатов исследований аспирантов А.С. Потапенко и А.Г.Иванова, выполненных в лаборатории совмещённых методов обработки ИЦМиМ СФУ при участии коллектива ученых ФГАОУ ВО «Сибирского федерального университета» А.П. Скуратова, Ю.В. Горохова, Н.П. Попияковой совместно с сотрудниками ООО «Завод современных материалов», показали возможность оперативного управления тепловыми процессами в установках непрерывного совмещенного литья и прессования цветных металлов, в частности:

– результаты компьютерного моделирования изменения температурно-временных зависимостей в широком диапазоне температуры перегрева заливаемого в горизонтальный кристаллизатор установки непрерывного совмещённого литья и прессования расплава АК-12 удовлетворительно согласуются с данными экспериментов и могут быть использованы при проектировании в производственных условиях данного технологического процесса;

– применение разработанной и запатентованной системы автоматического управления позволяет задать необходимый диапазон температур затвердевающего металлического расплава перед зоной прессования в переходных и установившихся режимах работы установки;

– установлена максимальная величины перегрева металлического расплава, превышение которой требует организации принудительного охлаждения элементов установки.

От ФГАОУ ВО СФУ

Зав. кафедрой ОМД ИЦМиМ  
д-р техн. наук, проф.

От ООО «Завод современных  
материалов»

«29» июля 2018 г.

  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_

С. Б. Сидельников

Р.В. Андреев



УТВЕРЖДАЮ:

И. о. ректор ФГАОУ ВО «Сибирский  
Федеральный университет

Колмаков В. И.

2018 г.

## АКТ

### внедрения в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается, что научные и практические результаты, изложенные в диссертационной работе аспиранта Потапенко Александра Сергеевича «Совершенствование тепловых процессов в установке непрерывного совмещенного литья и прессования цветных металлов» и в его научных публикациях, используются Сибирским федеральным университетом при подготовке бакалавров и магистров по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» в лекционных курсах и практикумах по дисциплинам «Теплотехника», «Математическое моделирование процессов тепломассопереноса», «Теплофизика», «Высокотемпературные установки», «Прикладные задачи теплотехнологии» и «Эксплуатация теплотехнологических установок», что позволяет повысить их компетенцию и эффективность при выполнении научно-исследовательских курсовых проектов и выпускных работ.

Директор ПИ СФУ

В.И. Пантелеев

Зав. кафедрой ТТиГТД

В.А. Кулагин



УТВЕРЖДАЮ:

И.о. ректор ФГАОУ ВО «Сибирский  
Федеральный университет

*В.И.* Колмаков В. И.

*17 июня* 2018 г.

## АКТ

внедрения в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается, что техническое решение по патенту РФ № 2657396 «Устройство управления тепловым режимом непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов», разработанное коллективом ученых ФГАОУ ВО «Сибирского федерального университета» в соавторстве с аспирантом А.С. Потапенко, используется при обучении магистров по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика теплотехника» (профиль 13.04.01.01 «Энергетика теплотехнологий) в лекционных курсах и практикумах по дисциплинам «Высокотемпературные установки» и «Эксплуатация теплотехнологических установок», что позволяет повысить их научную компетенцию и эффективность работы над магистерской диссертацией.

Директор ПИ СФУ

В.И. Пантелеев

Зав. кафедрой ТТиГТД

В.А. Кулагин



УТВЕРЖДАЮ:

И. о. ректора ФГАОУ ВО «Сибирский  
Федеральный университет

 Колмаков В. И.

2018 г.

## АКТ

внедрения в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается, что прикладной программный продукт для ЭВМ «Расчет температурных полей при кристаллизации расплава металла в ручье колеса установки Конформ-Кастекс» (свидетельство о государственной регистрации № 2017614574), разработанный коллективом ученых ФГАОУ ВО «Сибирского федерального университета» в составе А.С. Потапенко, А.П. Скуратова, Ю.В. Горохова и И.Ю. Губанова, используется при обучении магистров по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика теплотехника» (профиль 13.04.01.01 «Энергетика теплотехнологий») в лекционных курсах и практикумах по дисциплинам «Высокотемпературные установки» и «Прикладные задачи теплотехнологии», что позволяет повысить их научную компетенцию и эффективность работы над магистерской диссертацией.

Директор ПИ СФУ



В.И. Пантелеев

Зав. кафедрой ТТиГД



В.А. Кулагин

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Результаты моделирования

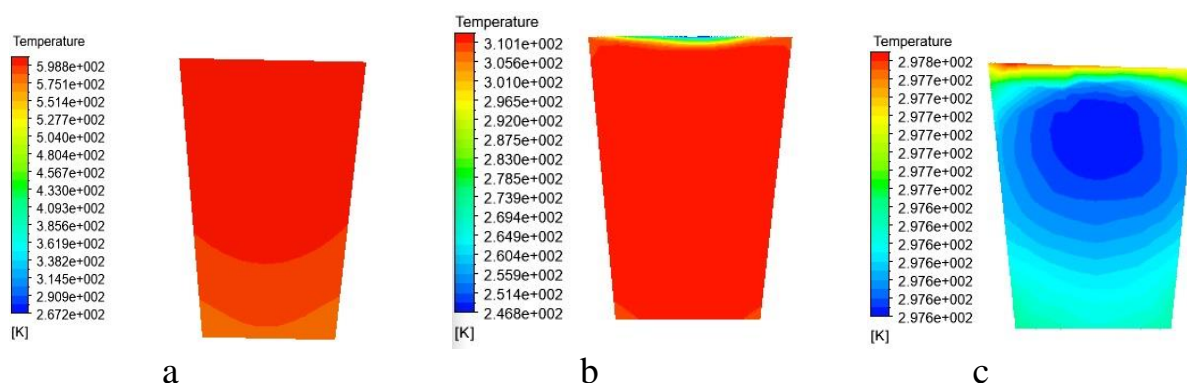


Рис. В.1. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 635^\circ\text{C}$ ,  $\tau=60\text{с.}$ , на удалении от места заливки:  
а –  $\varphi = 30^\circ$ ; б –  $\varphi = 120^\circ$  с –  $\varphi = 210^\circ$

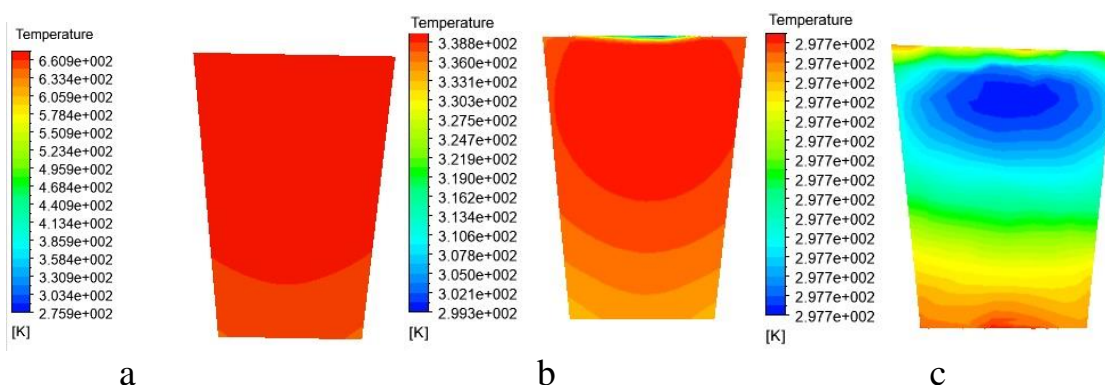


Рис. В.2. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 635^\circ\text{C}$ ,  $\tau=90\text{с.}$ , на удалении от места заливки:  
а –  $\varphi = 30^\circ$ ; б –  $\varphi = 120^\circ$  с –  $\varphi = 210^\circ$

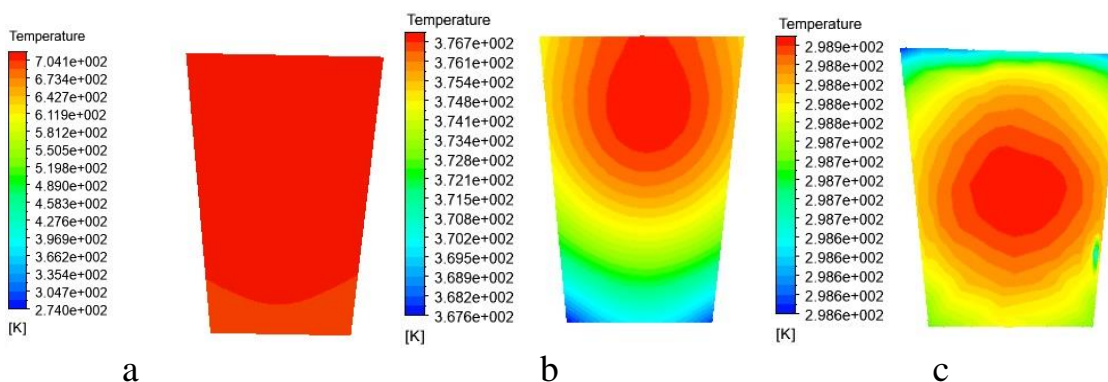


Рис. В.3. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 635^\circ\text{C}$ ,  $\tau=120\text{с.}$ , на удалении от места заливки:  
а –  $\varphi = 30^\circ$ ; б –  $\varphi = 120^\circ$  с –  $\varphi = 210^\circ$



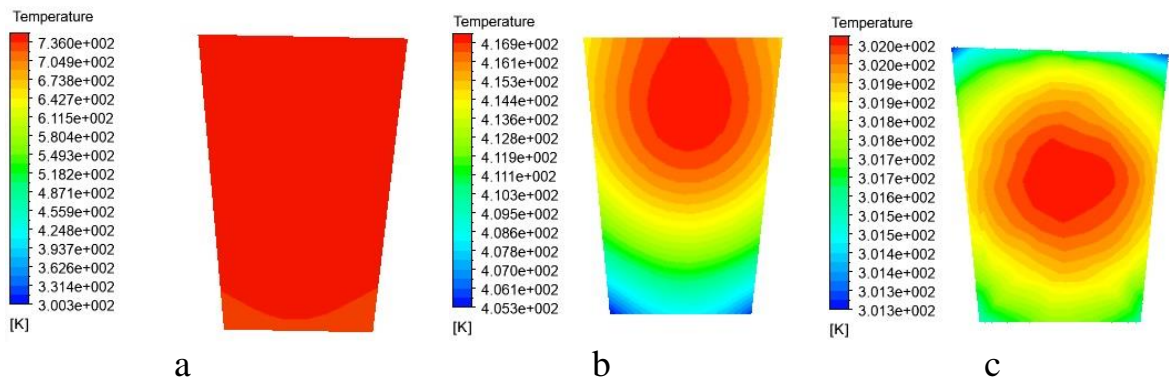


Рис. В.4. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 635^\circ\text{C}$ ,  $\tau=150\text{с.}$ , на удалении от места заливки:  
 а –  $\varphi = 30^\circ$ ; б –  $\varphi = 120^\circ$  с –  $\varphi = 210^\circ$

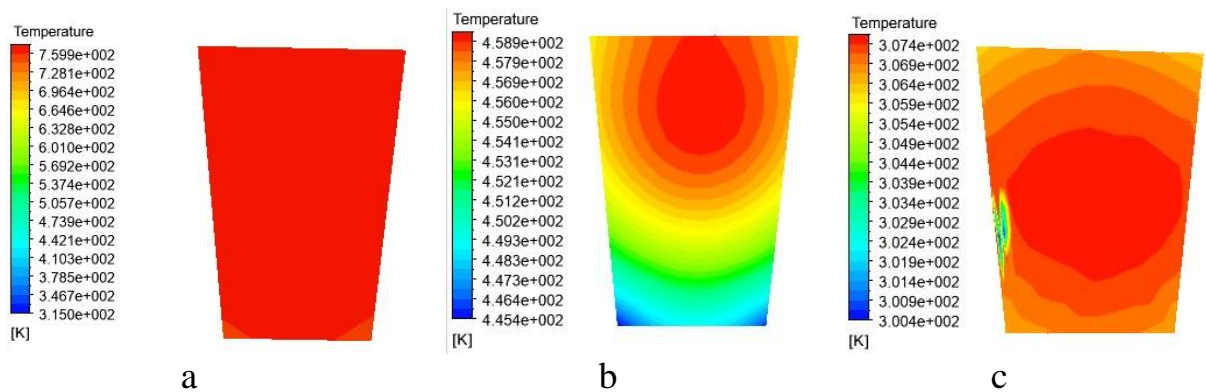


Рис. В.5. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 635^\circ\text{C}$ ,  $\tau=180\text{с.}$ , на удалении от места заливки:  
 а –  $\varphi = 30^\circ$ ; б –  $\varphi = 120^\circ$  с –  $\varphi = 210^\circ$

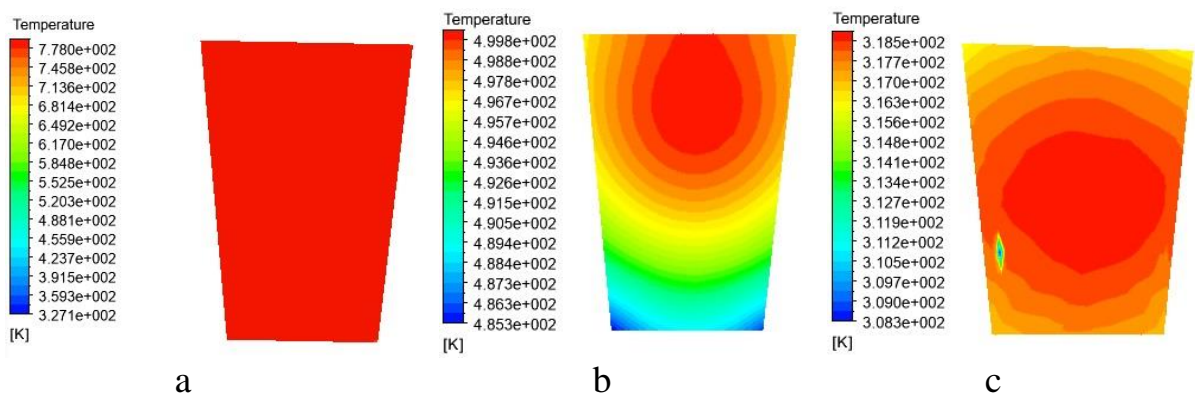


Рис. В.6. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 635^\circ\text{C}$ ,  $\tau=210\text{с.}$ , на удалении от места заливки:  
 а –  $\varphi = 30^\circ$ ; б –  $\varphi = 120^\circ$  с –  $\varphi = 210^\circ$

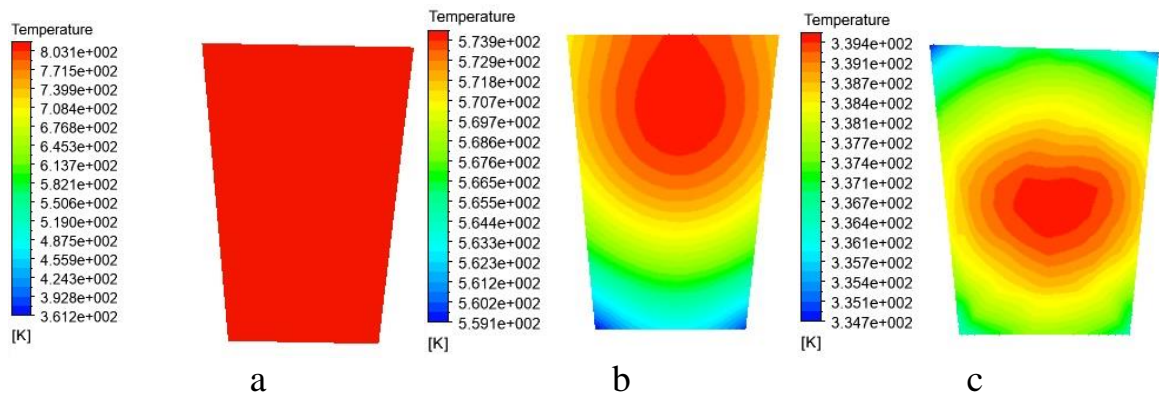


Рис. В.7. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 635^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 270\text{s}$ ., на удалении от места заливки: a –  $\phi = 30^\circ$ ; b –  $\phi = 120^\circ$  c –  $\phi = 210^\circ$

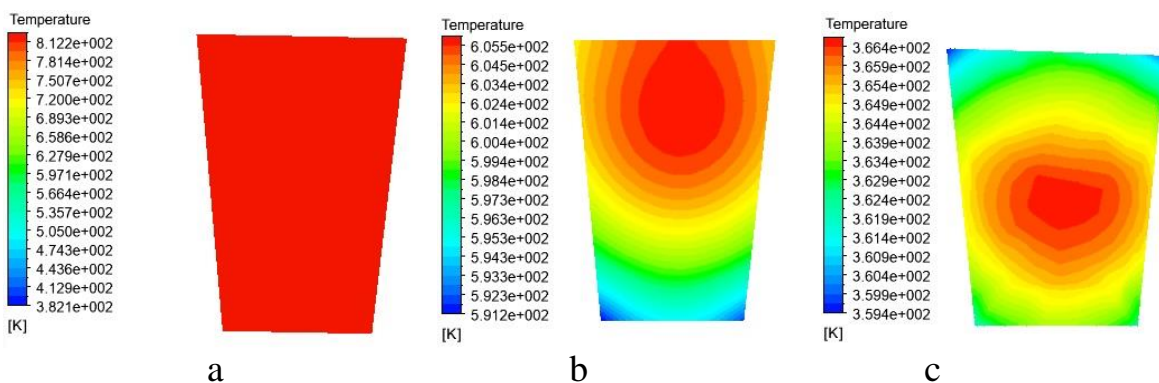


Рис. В.8. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 635^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 300\text{s}$ ., на удалении от места заливки: a –  $\phi = 30^\circ$ ; b –  $\phi = 120^\circ$  c –  $\phi = 210^\circ$

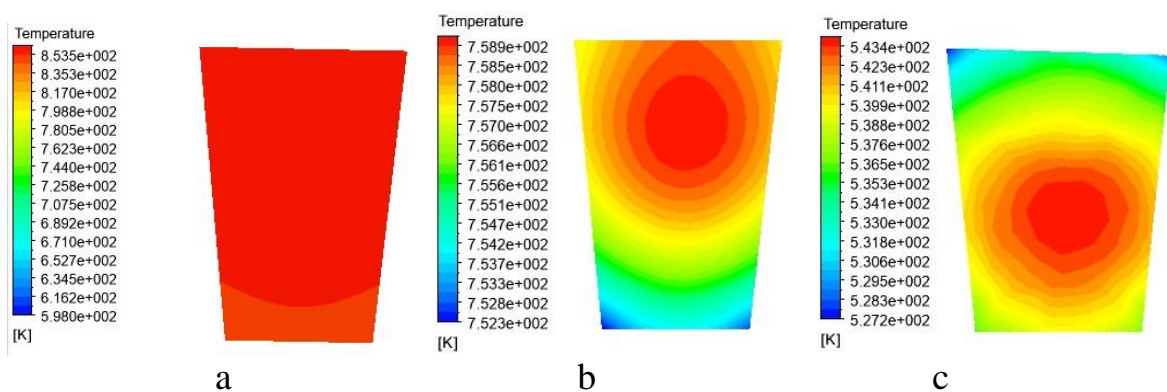


Рис. В.9. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 635^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 600\text{s}$ ., на удалении от места заливки: a –  $\phi = 30^\circ$ ; b –  $\phi = 120^\circ$  c –  $\phi = 210^\circ$

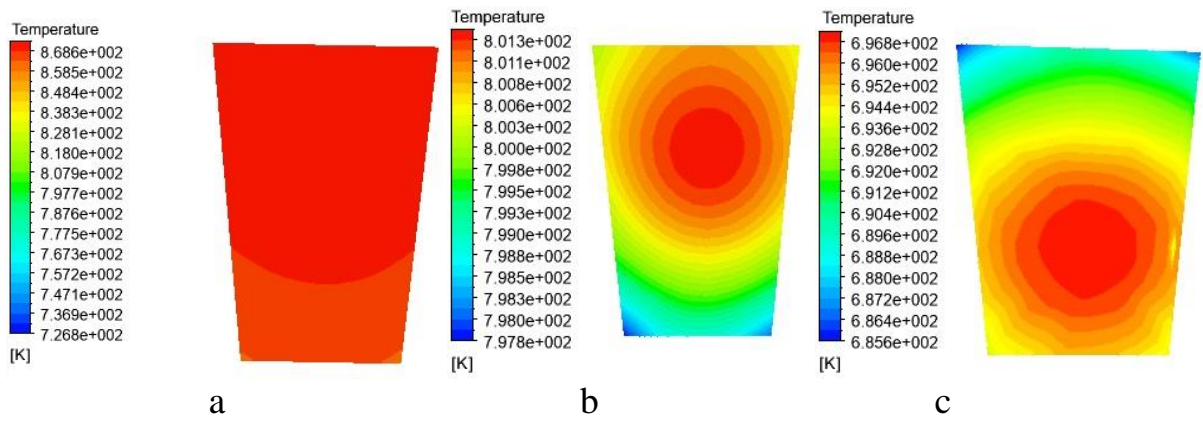


Рис. В.10. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 635^\circ\text{C}$  после выхода на стационарный тепловой режим, на удалении от места заливки:  
 а –  $\phi = 30^\circ$ ; б –  $\phi = 120^\circ$  с –  $\phi = 210^\circ$

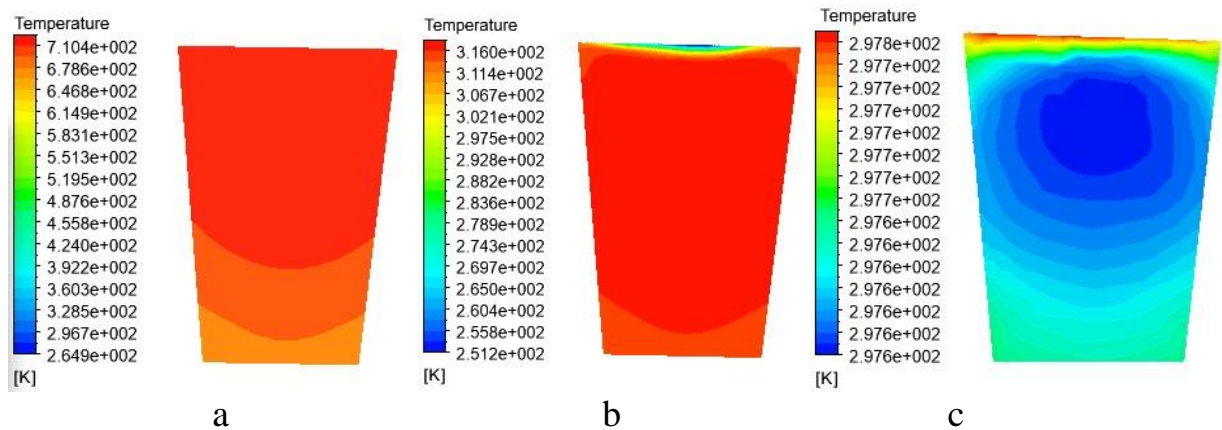


Рис. В.11. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 690^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 60\text{s}$ , на удалении от места заливки:  
 а –  $\phi = 30^\circ$ ; б –  $\phi = 120^\circ$  с –  $\phi = 210^\circ$

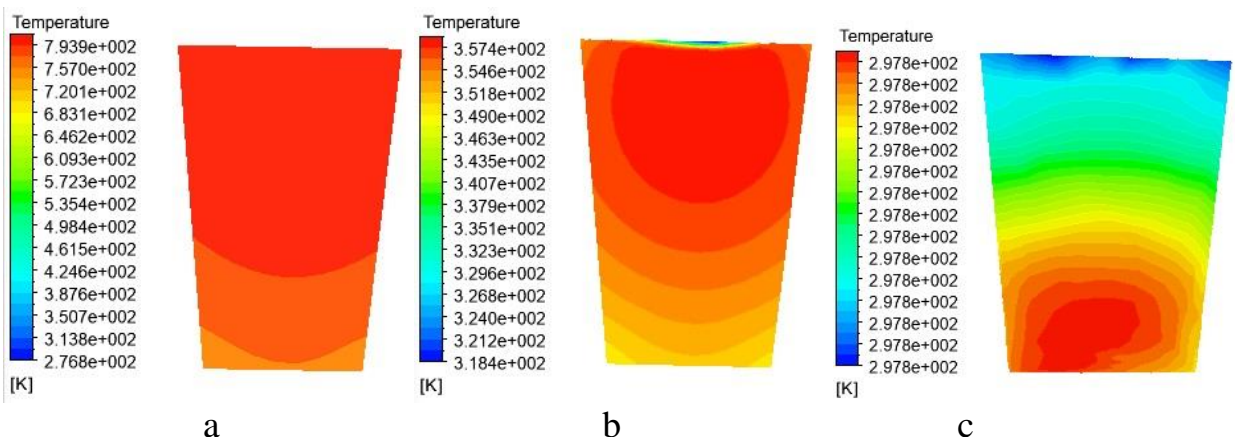


Рис. В.12. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 690^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 90\text{s}$ , на удалении от места заливки:  
 а –  $\phi = 30^\circ$ ; б –  $\phi = 120^\circ$  с –  $\phi = 210^\circ$

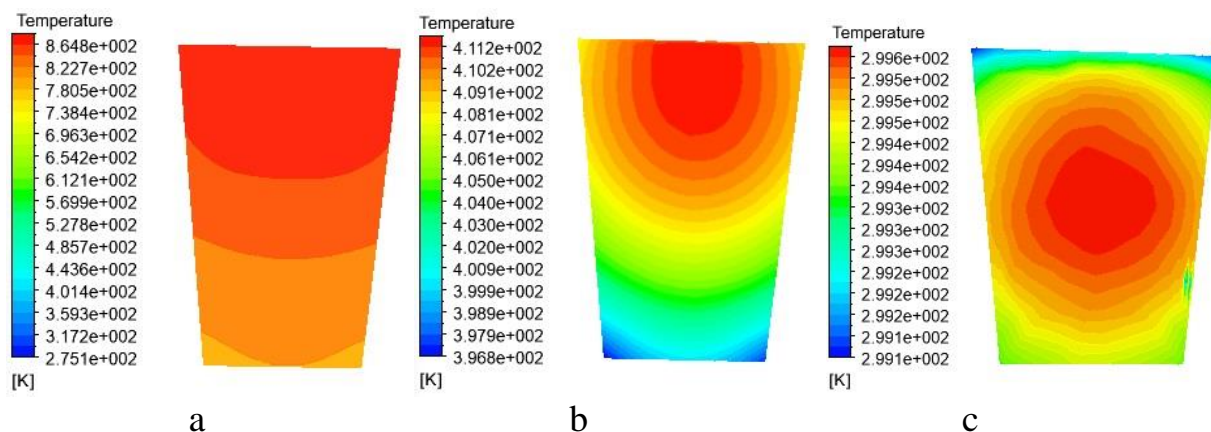


Рис. В.13. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 690^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 120\text{s}$ , на удалении от места заливки: a –  $\varphi = 30^\circ$ ; b –  $\varphi = 120^\circ$  c –  $\varphi = 210^\circ$

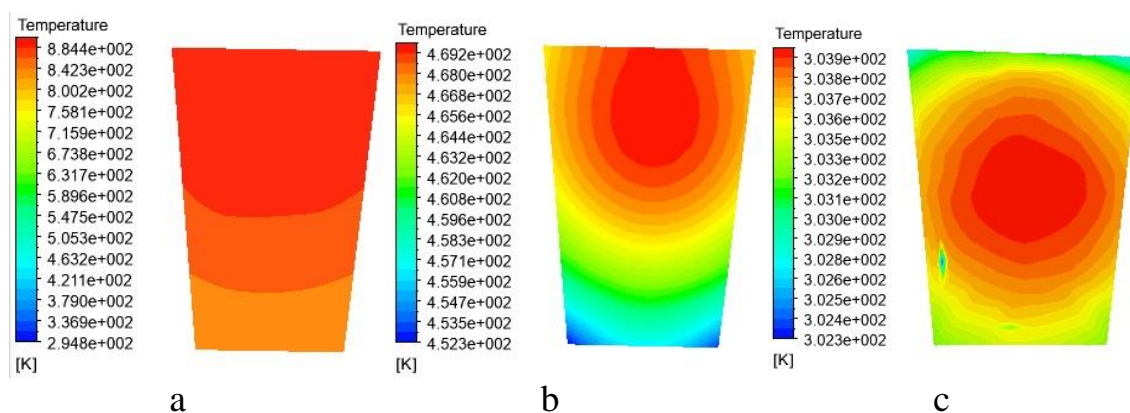


Рис. В.14. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 690^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 150\text{s}$ , на удалении от места заливки: a –  $\varphi = 30^\circ$ ; b –  $\varphi = 120^\circ$  c –  $\varphi = 210^\circ$

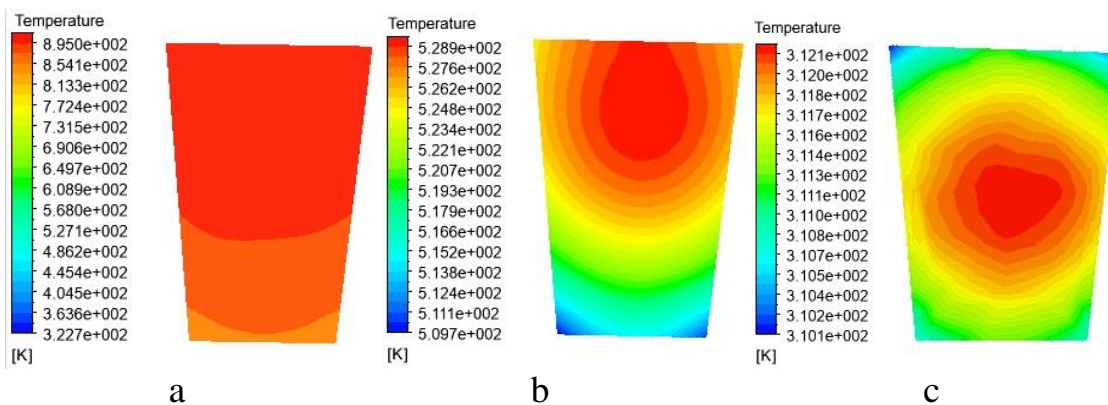


Рис. В.15. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 690^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 180\text{s}$ , на удалении от места заливки: a –  $\varphi = 30^\circ$ ; b –  $\varphi = 120^\circ$  c –  $\varphi = 210^\circ$

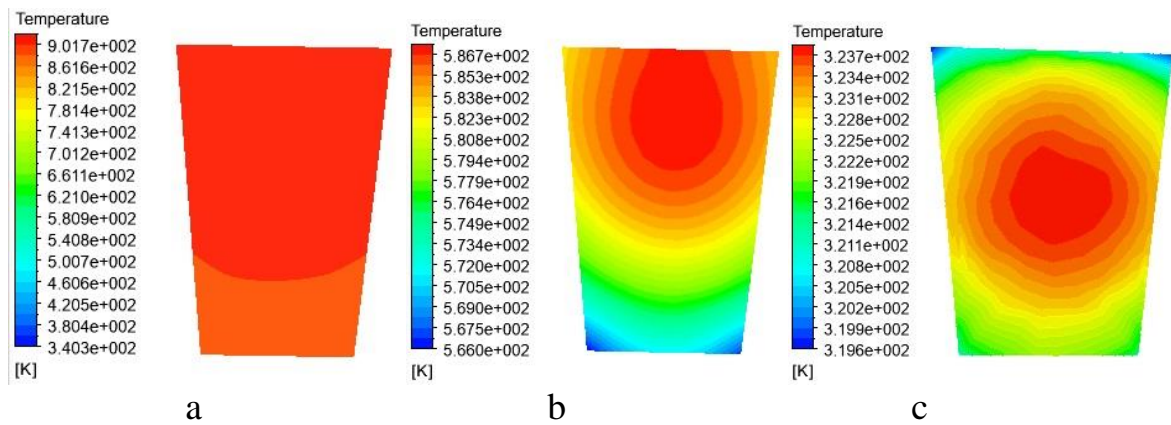


Рис. В.16. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 690^\circ\text{C}$ ,  $\tau=210\text{c.}$ , на удалении от места заливки:  
 a –  $\varphi = 30^\circ$ ; b –  $\varphi = 120^\circ$  c –  $\varphi = 210^\circ$

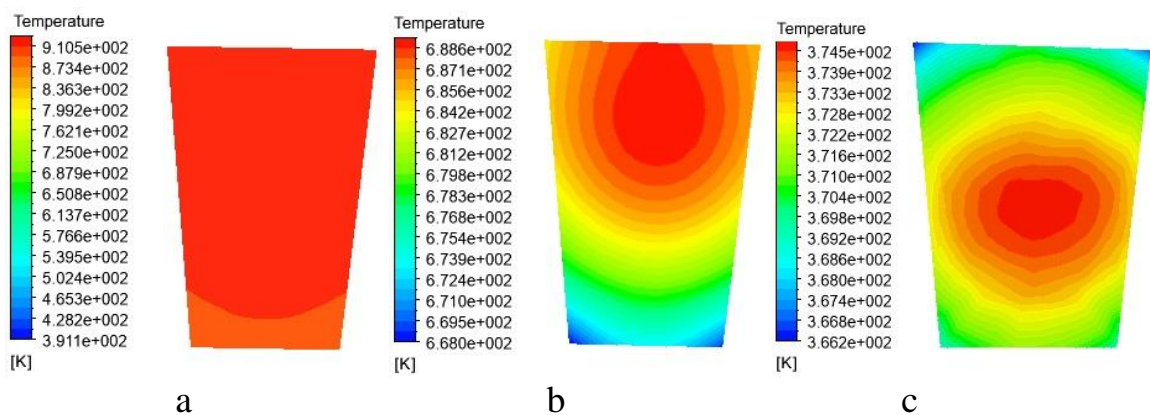


Рис. В.17. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 690^\circ\text{C}$ ,  $\tau=270\text{c.}$ , на удалении от места заливки:  
 a –  $\varphi = 30^\circ$ ; b –  $\varphi = 120^\circ$  c –  $\varphi = 210^\circ$

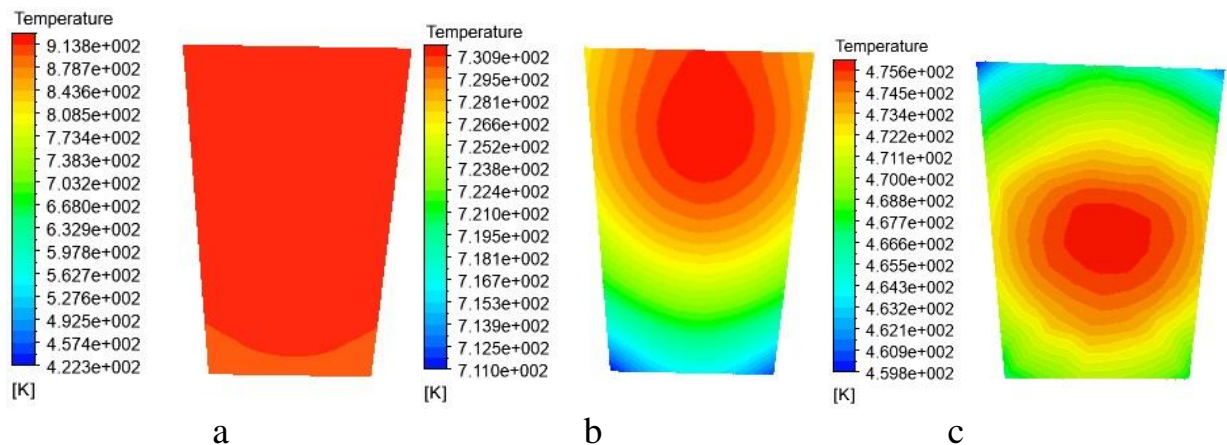


Рис. В.18. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 690^\circ\text{C}$ ,  $\tau=300\text{c.}$ , на удалении от места заливки:  
 a –  $\varphi = 30^\circ$ ; b –  $\varphi = 120^\circ$  c –  $\varphi = 210^\circ$

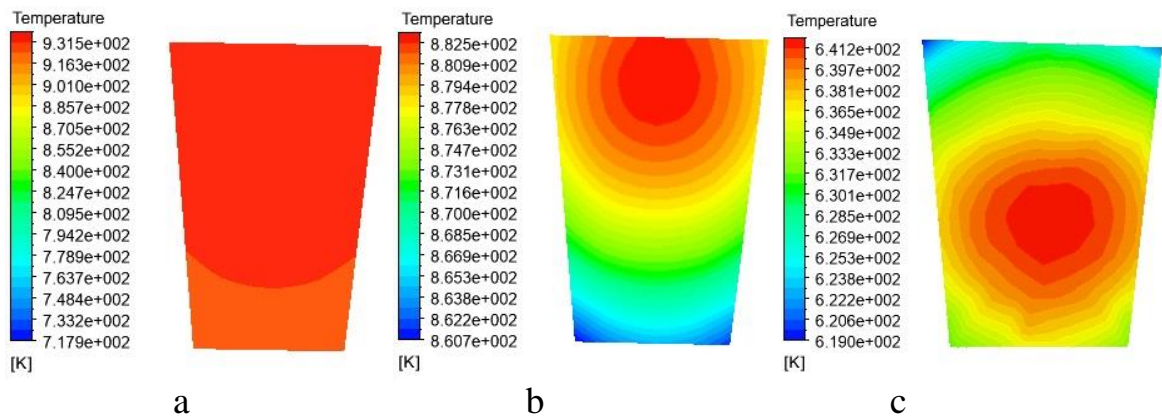


Рис. В.19. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 690^\circ\text{C}$ ,  $\tau=600\text{с.}$ , на удалении от места заливки:  
 а –  $\phi = 30^\circ$ ; б –  $\phi = 120^\circ$  с –  $\phi = 210^\circ$

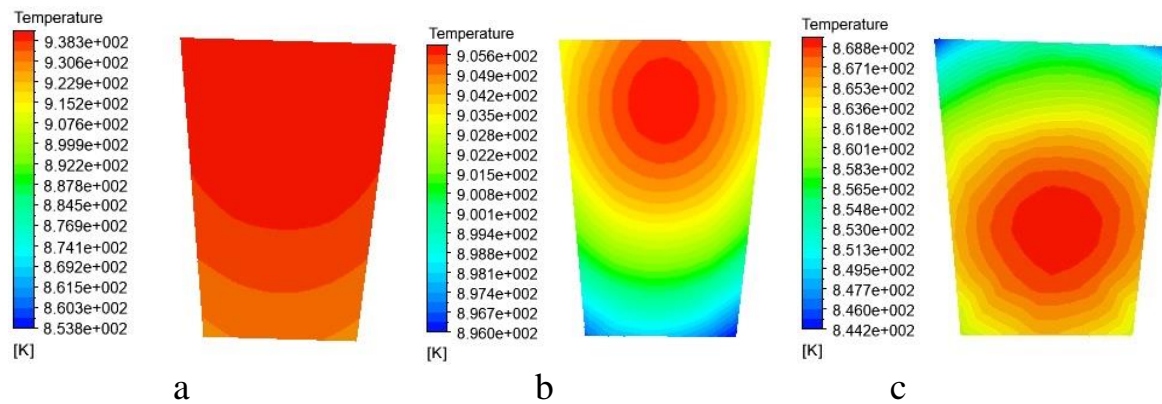


Рис. В.20. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 690^\circ\text{C}$  после выхода на стационарный тепловой режим, на удалении от места заливки:  
 а –  $\phi = 30^\circ$ ; б –  $\phi = 120^\circ$  с –  $\phi = 210^\circ$

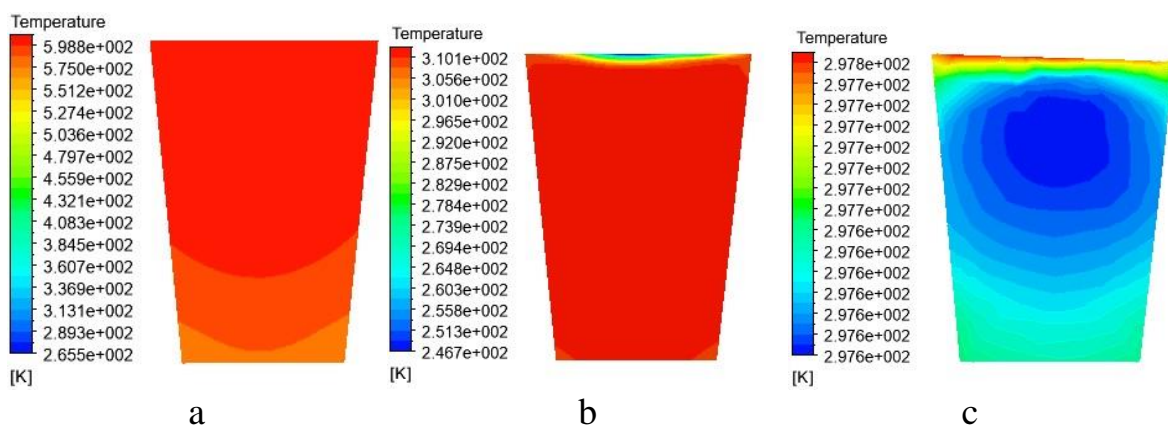


Рис. В.21. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 750^\circ\text{C}$ ,  $\tau=60\text{с.}$ , на удалении от места заливки:  
 а –  $\phi = 30^\circ$ ; б –  $\phi = 120^\circ$  с –  $\phi = 210^\circ$

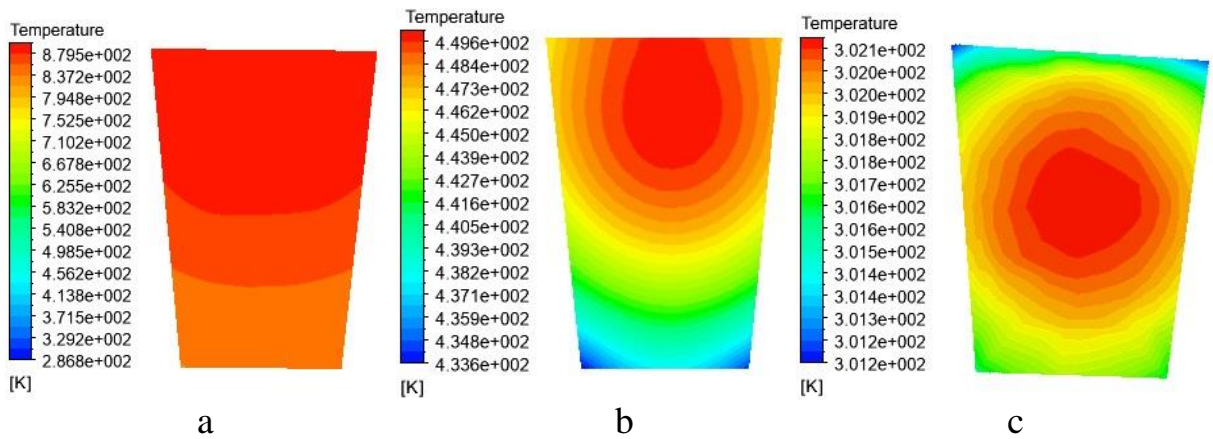


Рис. В.22. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 750^\circ\text{C}$ ,  $\tau=90\text{с.}$ , на удалении от места заливки:  
 а –  $\varphi = 30^\circ$ ; б –  $\varphi = 120^\circ$  с –  $\varphi = 210^\circ$

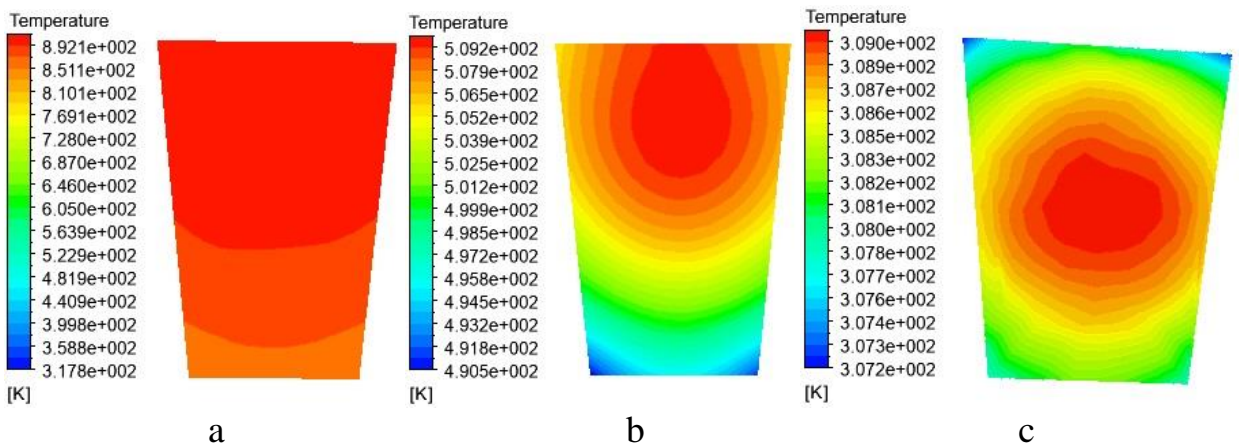


Рис. В.23. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 750^\circ\text{C}$ ,  $\tau=120\text{с.}$ , на удалении от места заливки:  
 а –  $\varphi = 30^\circ$ ; б –  $\varphi = 120^\circ$  с –  $\varphi = 210^\circ$

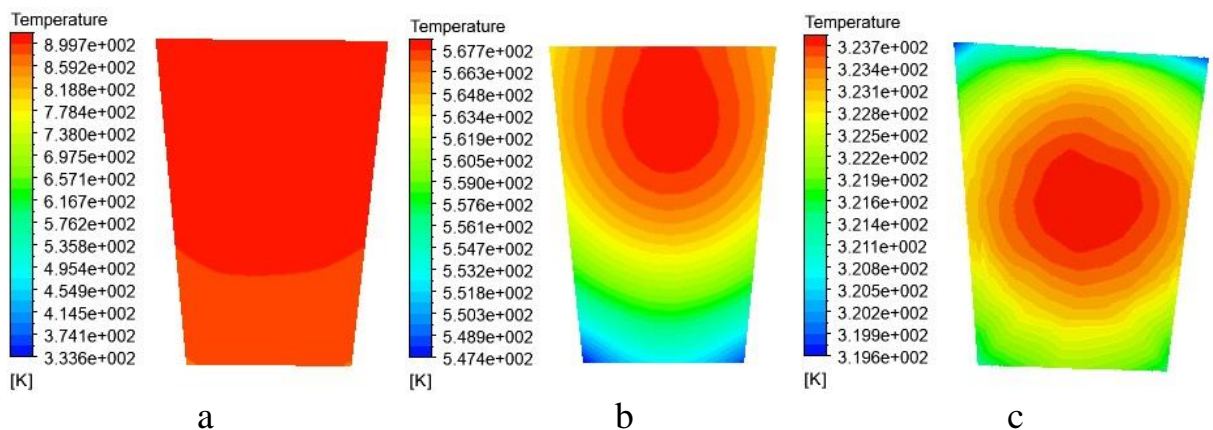


Рис. В.24. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 750^\circ\text{C}$ ,  $\tau=150\text{с.}$ , на удалении от места заливки:  
 а –  $\varphi = 30^\circ$ ; б –  $\varphi = 120^\circ$  с –  $\varphi = 210^\circ$

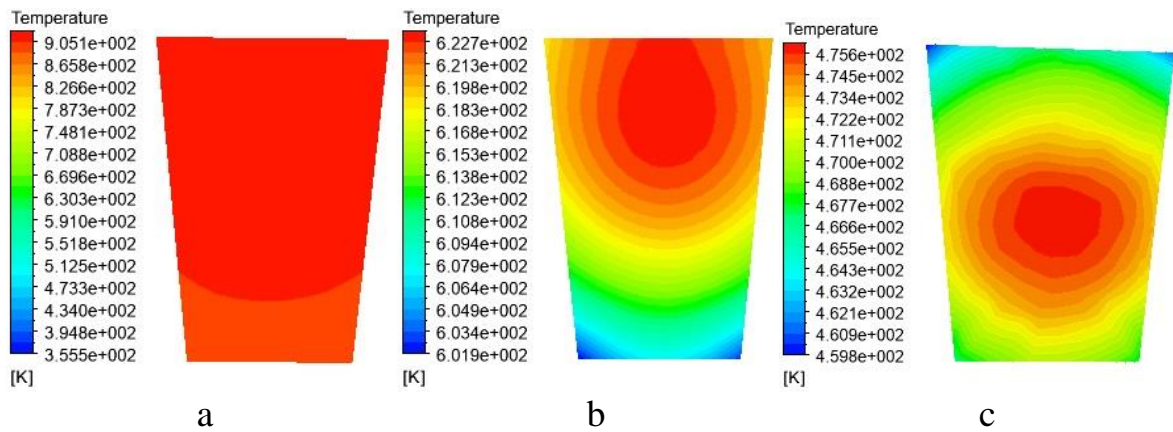


Рис. В.25. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 750^\circ\text{C}$ ,  $\tau=180\text{с.}$ , на удалении от места заливки:  $a - \varphi = 30^\circ$ ;  $b - \varphi = 120^\circ$   $c - \varphi = 210^\circ$

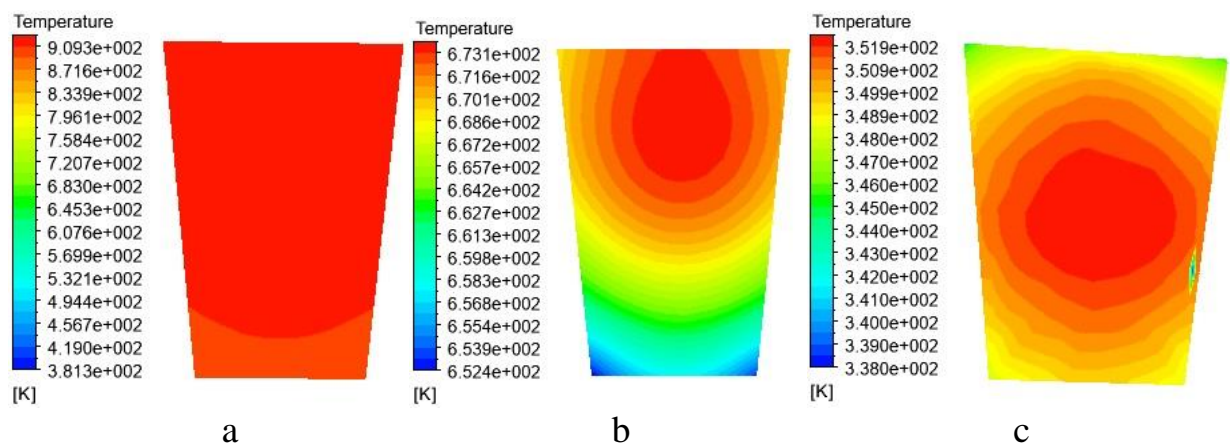


Рис. В.26. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 750^\circ\text{C}$ ,  $\tau=210\text{с.}$ , на удалении от места заливки:  $a - \varphi = 30^\circ$ ;  $b - \varphi = 120^\circ$   $c - \varphi = 210^\circ$

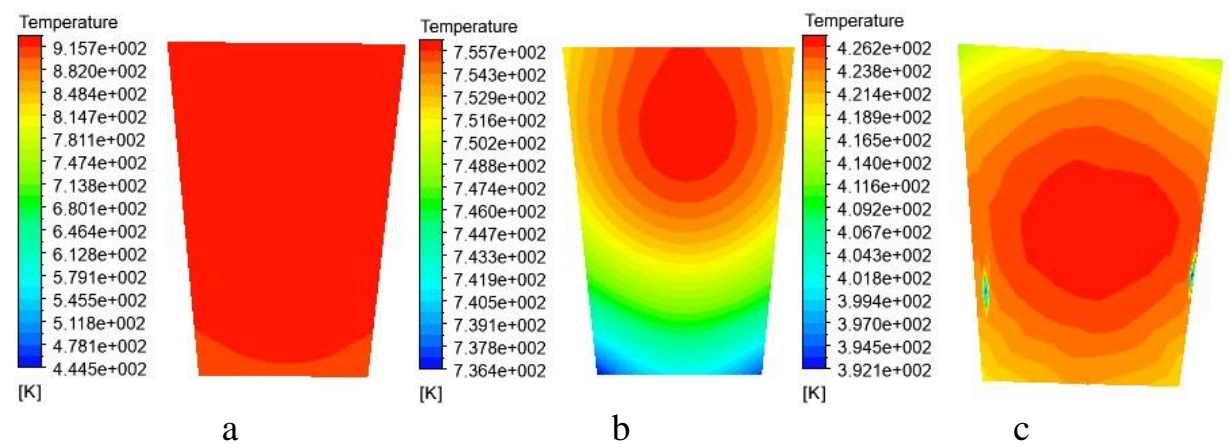


Рис. В.27. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 750^\circ\text{C}$ ,  $\tau=270\text{с.}$ , на удалении от места заливки:  $a - \varphi = 30^\circ$ ;  $b - \varphi = 120^\circ$   $c - \varphi = 210^\circ$



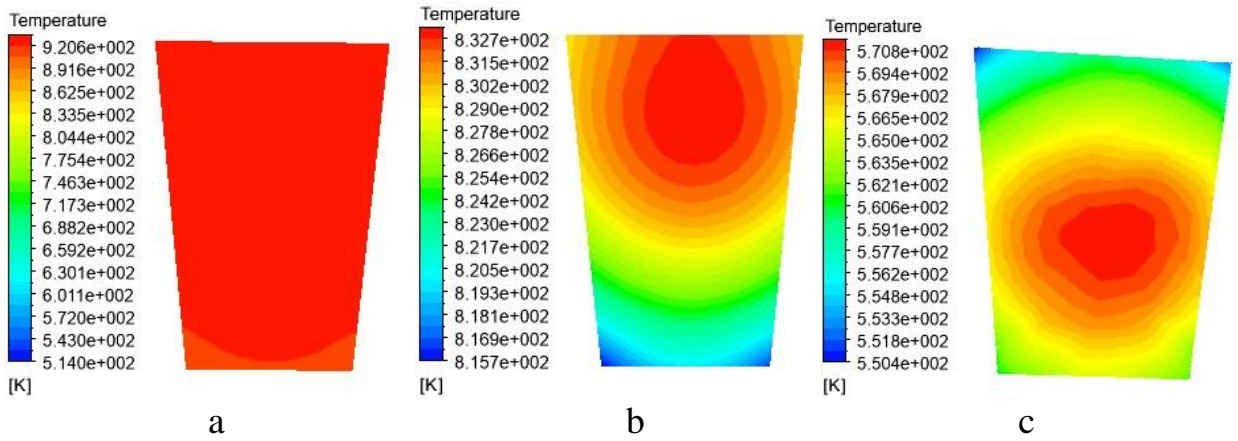


Рис. В.28. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 750^\circ\text{C}$ ,  $\tau=300\text{с.}$ , на удалении от места заливки:  
 а –  $\varphi = 30^\circ$ ; б –  $\varphi = 120^\circ$  с –  $\varphi = 210^\circ$

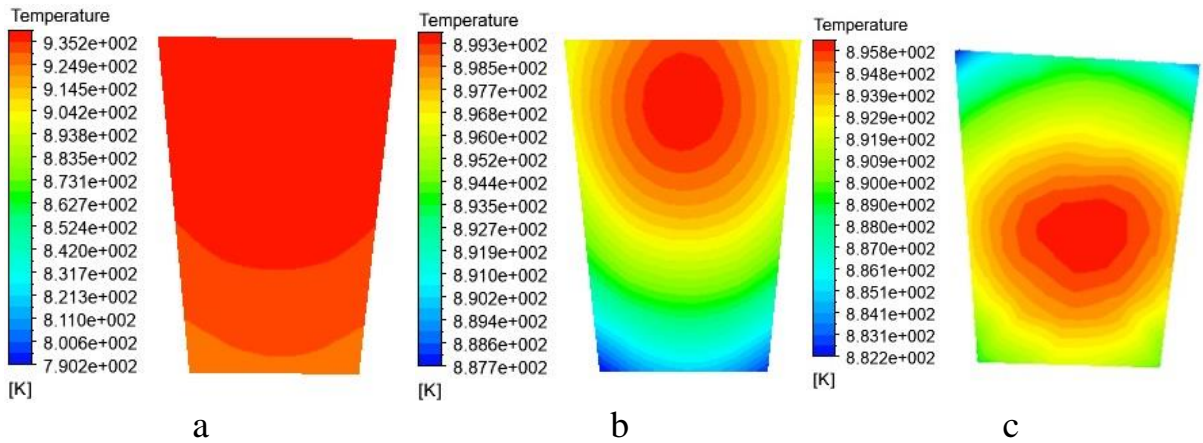


Рис. В.29. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 750^\circ\text{C}$ ,  $\tau=600\text{с.}$ , на удалении от места заливки:  
 а –  $\varphi = 30^\circ$ ; б –  $\varphi = 120^\circ$  с –  $\varphi = 210^\circ$

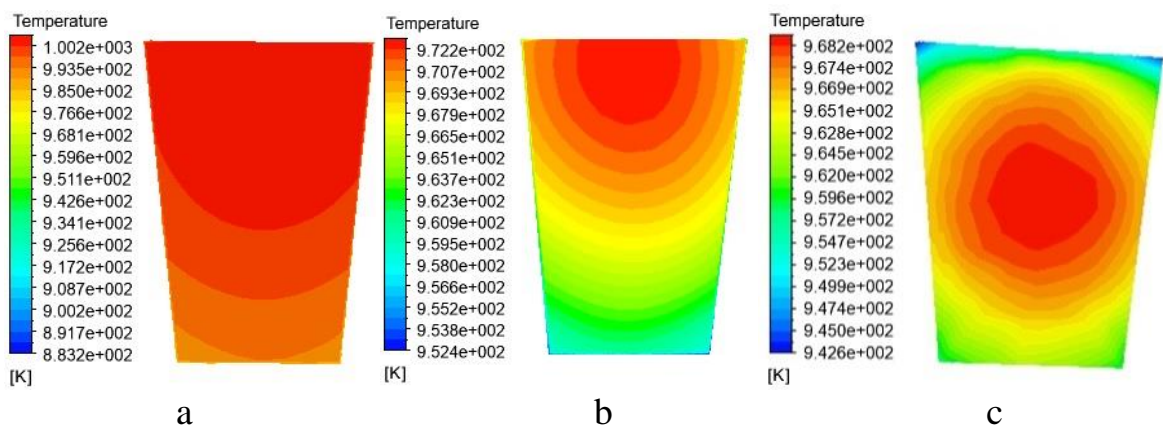


Рис. В.30. Распределение температуры в контрольных сечениях металла при температуре разливки  $t_p = 750^\circ\text{C}$  после выхода на стационарный тепловой режим, на удалении от места заливки:  
 а –  $\varphi = 30^\circ$ ; б –  $\varphi = 120^\circ$  с –  $\varphi = 210^\circ$

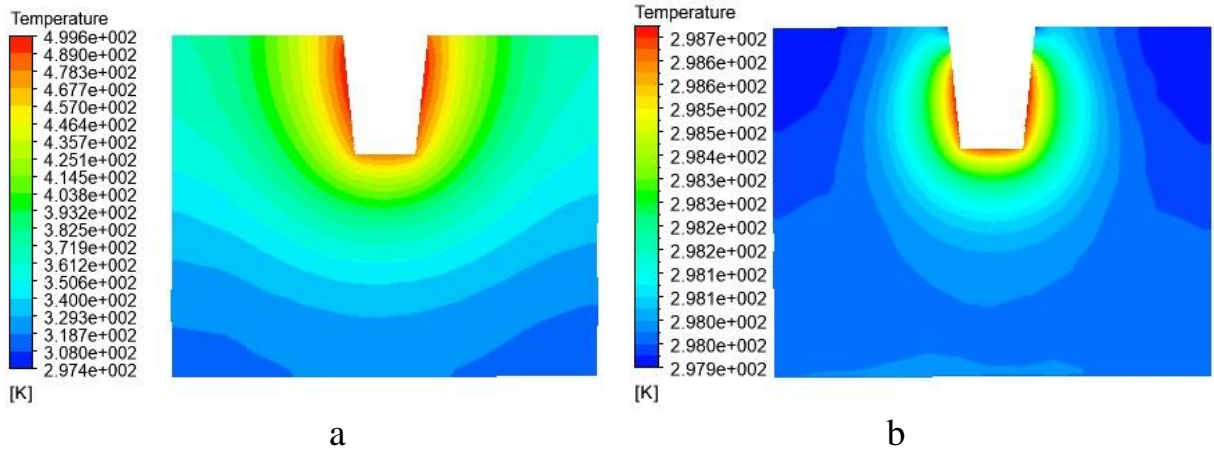


Рис. В.31. Распределение температуры в контрольных сечениях кристаллизатора при  $t_p = 635^\circ\text{C}$ ,  $\tau=30\text{с.}$ , на удалении от места заливки: a –  $\varphi = 30^\circ$ ; b –  $\varphi = 120^\circ$

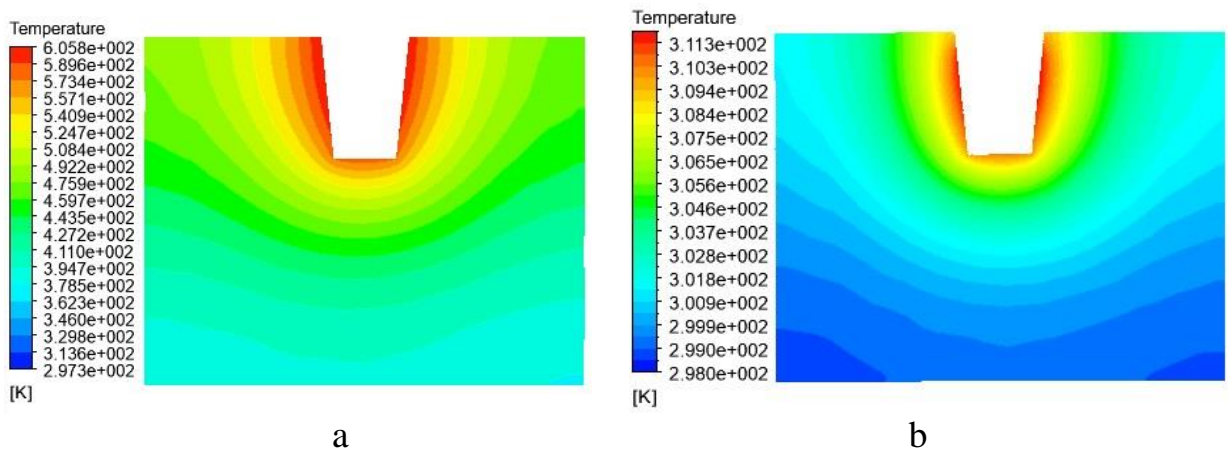


Рис. В.32. Распределение температуры в контрольных сечениях кристаллизатора при  $t_p = 635^\circ\text{C}$ ,  $\tau=60\text{с.}$ , на удалении от места заливки: a –  $\varphi = 30^\circ$ ; b –  $\varphi = 120^\circ$

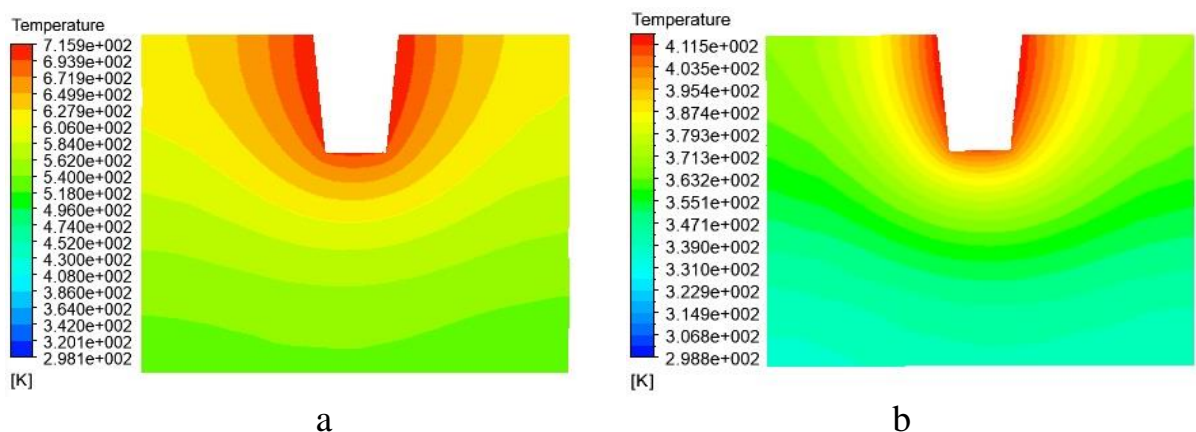


Рис. В.33. Распределение температуры в контрольных сечениях кристаллизатора при  $t_p = 635^\circ\text{C}$ ,  $\tau=120\text{с.}$ , на удалении от места заливки: a –  $\varphi = 30^\circ$ ; b –  $\varphi = 120^\circ$

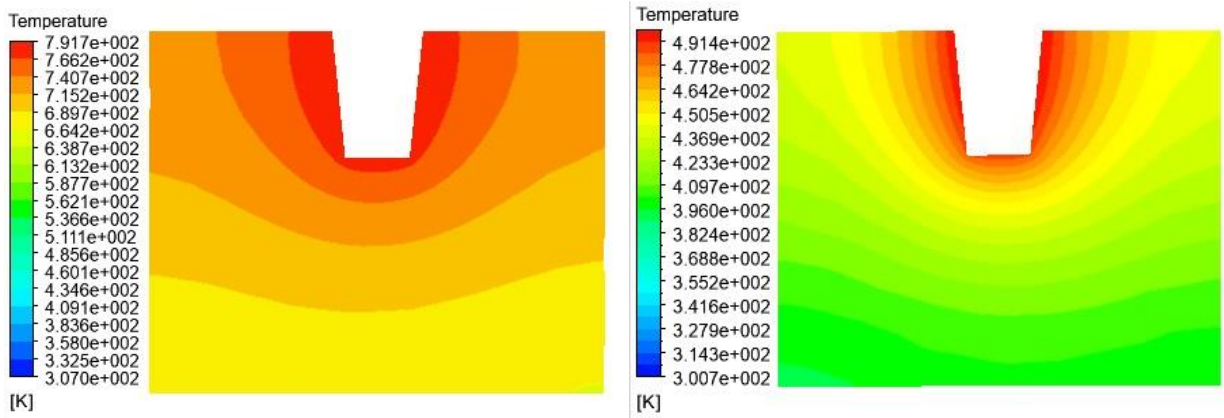


Рис. В.34. Распределение температуры в контрольных сечениях кристаллизатора при  $t_p = 635^\circ\text{C}$ ,  $\tau=210\text{с.}$ , на удалении от места заливки: a –  $\varphi = 30^\circ$ ; b –  $\varphi = 120^\circ$

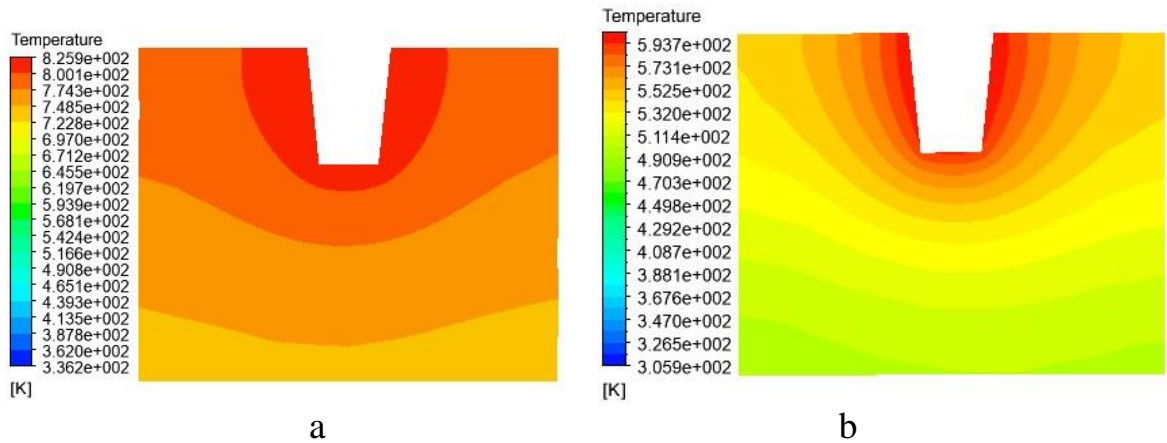


Рис. В.35. Распределение температуры в контрольных сечениях кристаллизатора при  $t_p = 635^\circ\text{C}$ ,  $\tau=300\text{с.}$ , на удалении от места заливки: a –  $\varphi = 30^\circ$ ; b –  $\varphi = 120^\circ$

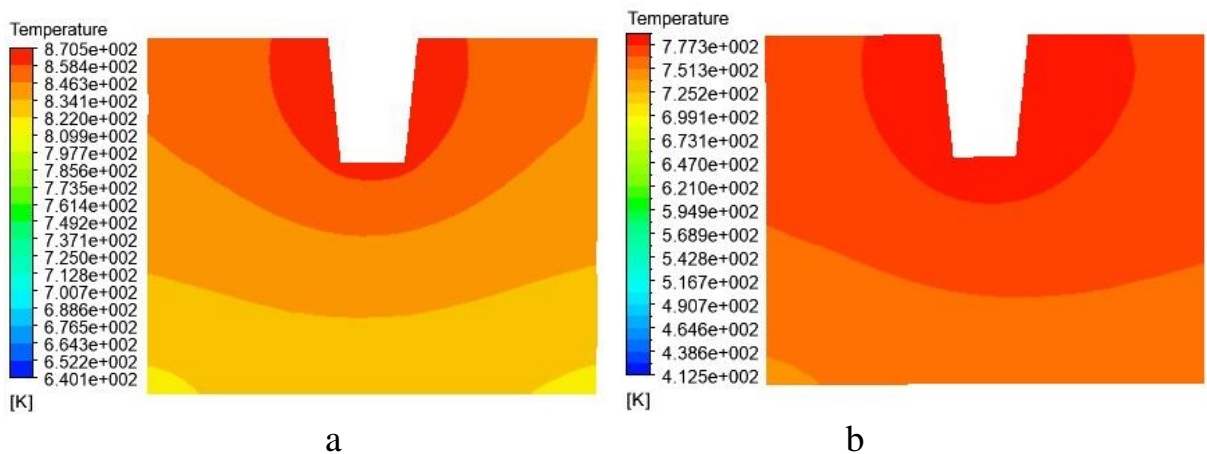


Рис. В.36. Распределение температуры в контрольных сечениях кристаллизатора при  $t_p = 635^\circ\text{C}$  после выхода на стационарный тепловой режим, на удалении от места заливки: a –  $\varphi = 30^\circ$ ; b –  $\varphi = 120^\circ$

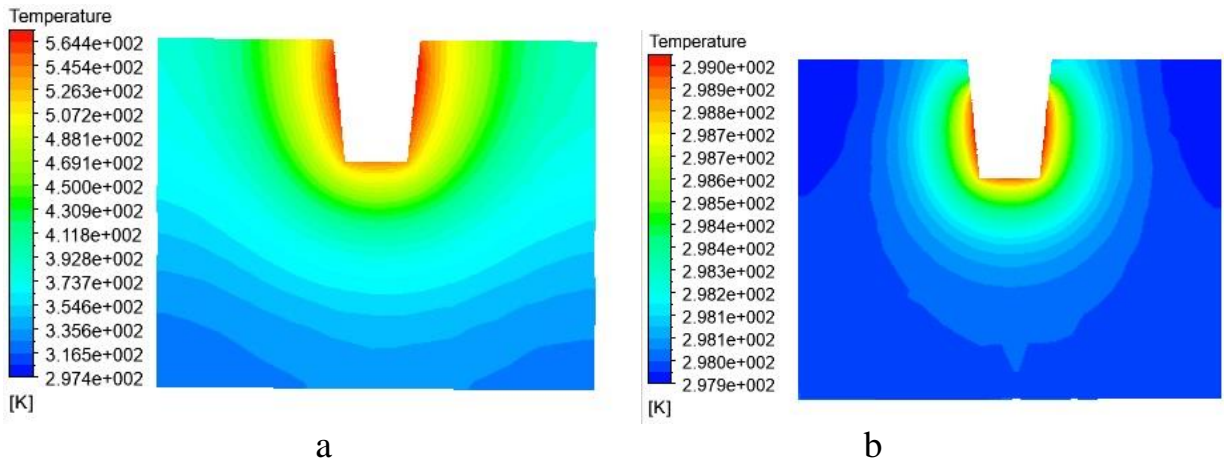


Рис. В.37. Распределение температуры в контрольных сечениях кристаллизатора при  $t_p = 690^\circ\text{C}$ ,  $\tau=30\text{с.}$ , на удалении от места заливки: a –  $\varphi = 30^\circ$ ; b –  $\varphi = 120^\circ$

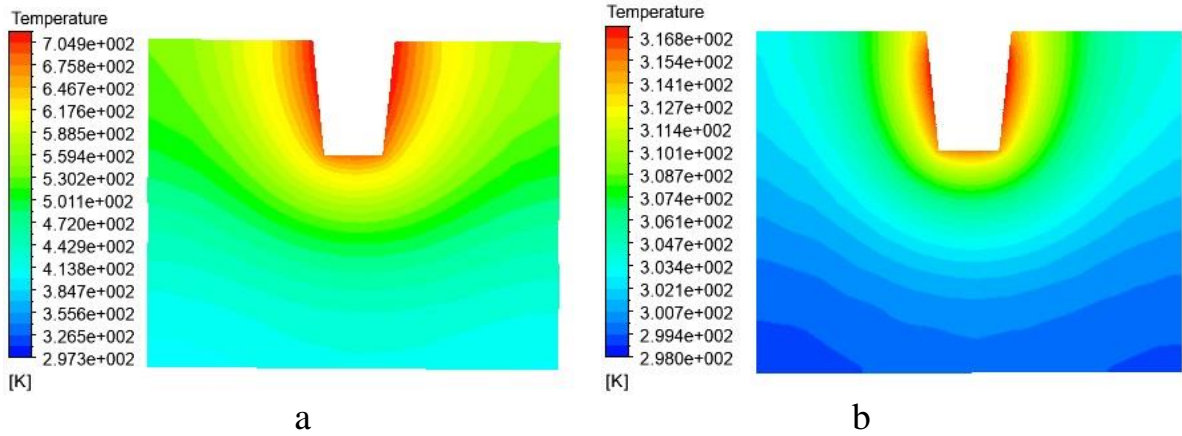


Рис. В.38. Распределение температуры в контрольных сечениях кристаллизатора при  $t_p = 690^\circ\text{C}$ ,  $\tau=60\text{с.}$ , на удалении от места заливки: a –  $\varphi = 30^\circ$ ; b –  $\varphi = 120^\circ$

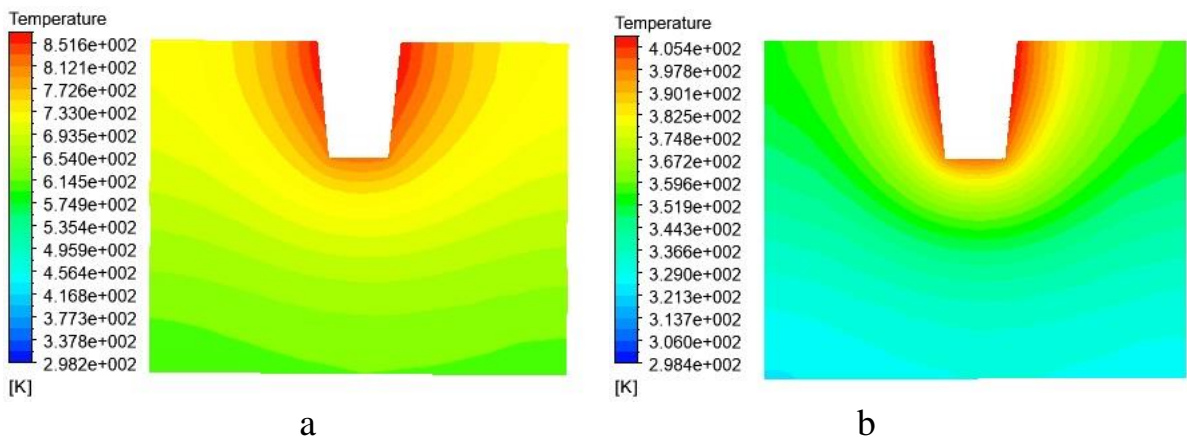


Рис. В.39. Распределение температуры в контрольных сечениях кристаллизатора при  $t_p = 690^\circ\text{C}$ ,  $\tau=120\text{с.}$ , на удалении от места заливки: a –  $\varphi = 30^\circ$ ; b –  $\varphi = 120^\circ$

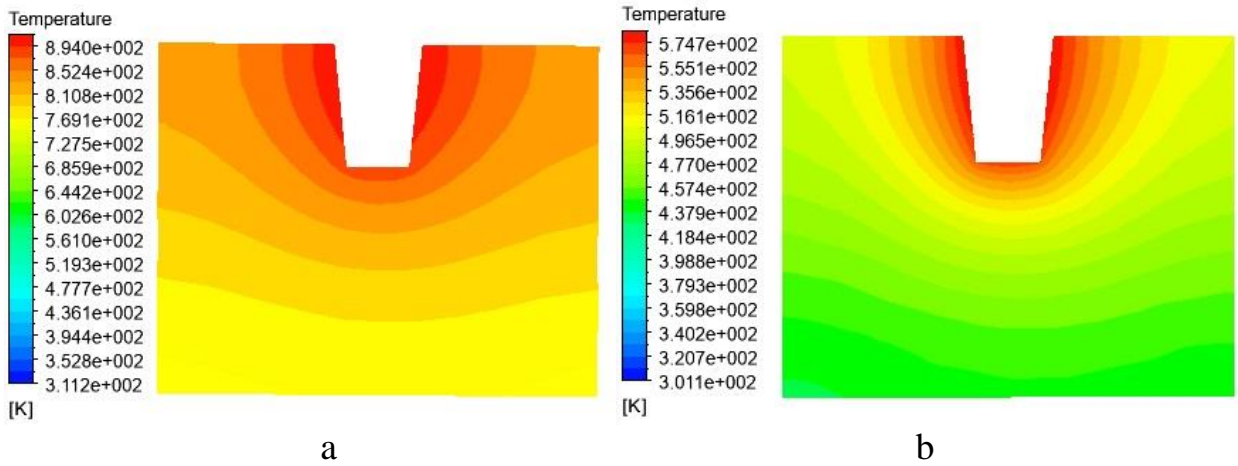


Рис. В.40. Распределение температуры в контрольных сечениях кристаллизатора при  $t_p = 690^\circ\text{C}$ ,  $\tau=210\text{с.}$ , на удалении от места заливки:  
 а –  $\varphi = 30^\circ$ ; б –  $\varphi = 120^\circ$

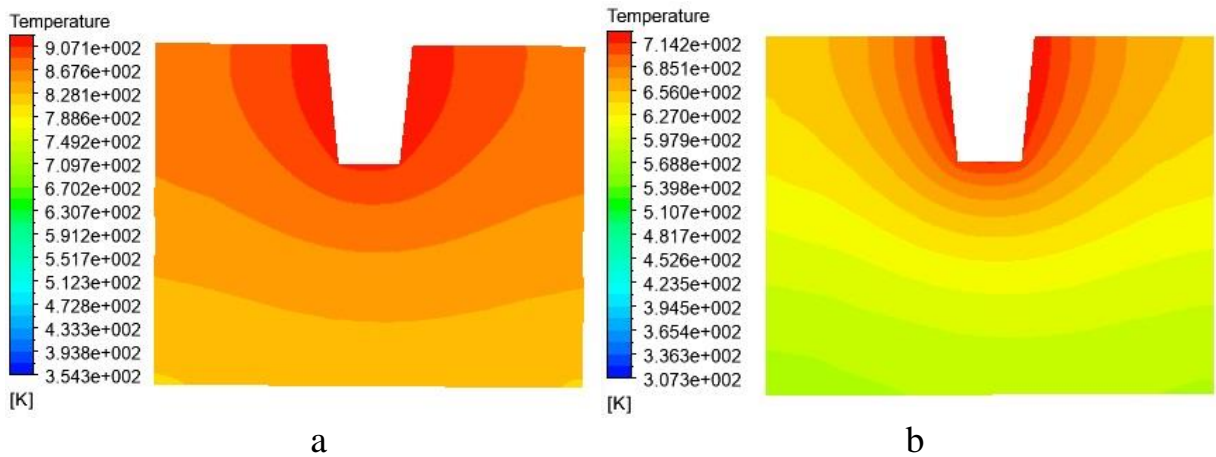


Рис. В.41. Распределение температуры в контрольных сечениях кристаллизатора при  $t_p = 690^\circ\text{C}$ ,  $\tau=300\text{с.}$ , на удалении от места заливки:  
 а –  $\varphi = 30^\circ$ ; б –  $\varphi = 120^\circ$

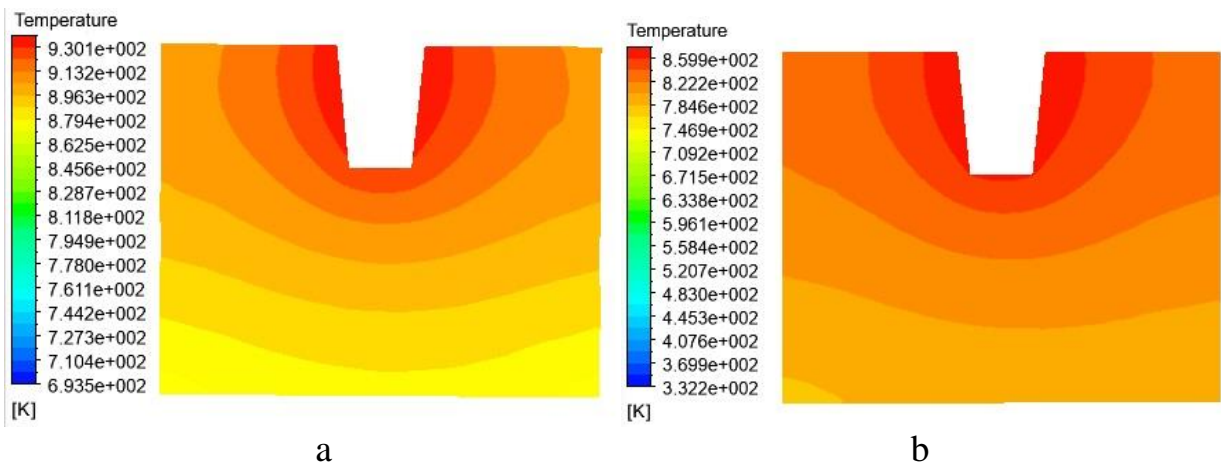


Рис. В.42. Распределение температуры в контрольных сечениях кристаллизатора при  $t_p = 690^\circ\text{C}$  после выхода на стационарный тепловой режим, на удалении от места заливки:  
 а –  $\varphi = 30^\circ$ ; б –  $\varphi = 120^\circ$

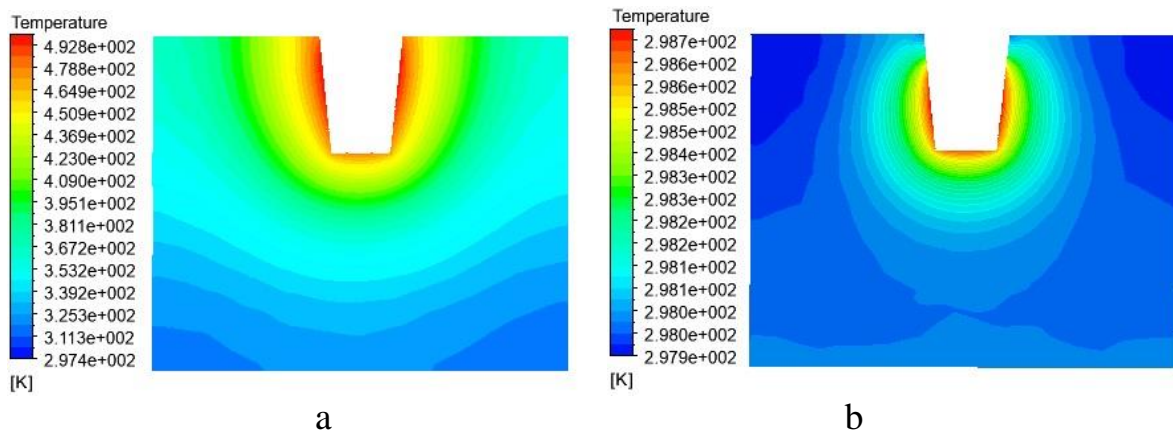


Рис. В.43. Распределение температуры в контрольных сечениях кристаллизатора при  $t_p = 750^\circ\text{C}$ ,  $\tau=30\text{с.}$ , на удалении от места заливки: а –  $\varphi = 30^\circ$ ; б –  $\varphi = 120^\circ$

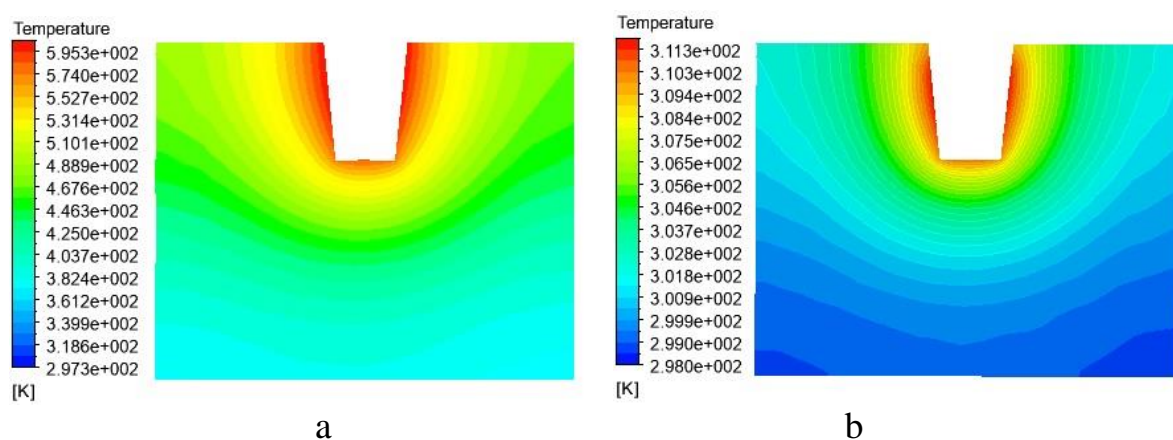


Рис. В.44. Распределение температуры в контрольных сечениях кристаллизатора при  $t_p = 750^\circ\text{C}$ ,  $\tau=60\text{с.}$ , на удалении от места заливки: а –  $\varphi = 30^\circ$ ; б –  $\varphi = 120^\circ$

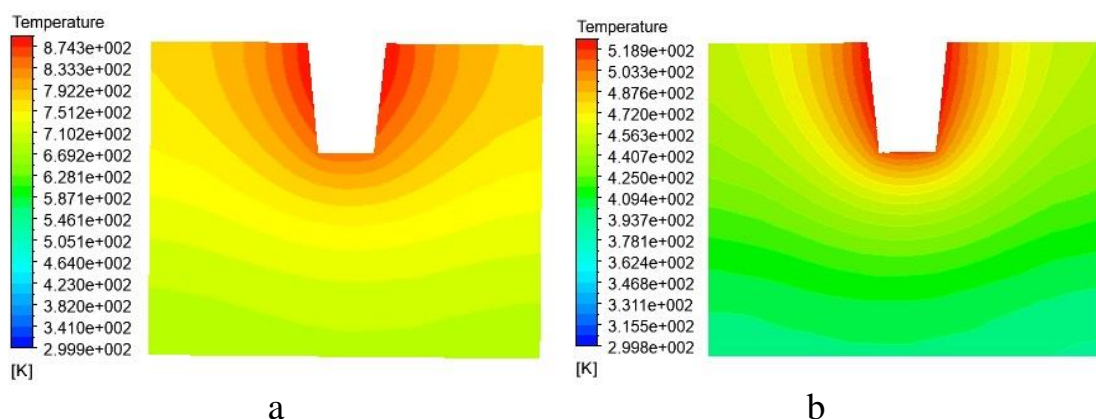


Рис. В.45. Распределение температуры в контрольных сечениях кристаллизатора при  $t_p = 750^\circ\text{C}$ ,  $\tau=120\text{с.}$ , на удалении от места заливки: а –  $\varphi = 30^\circ$ ; б –  $\varphi = 120^\circ$

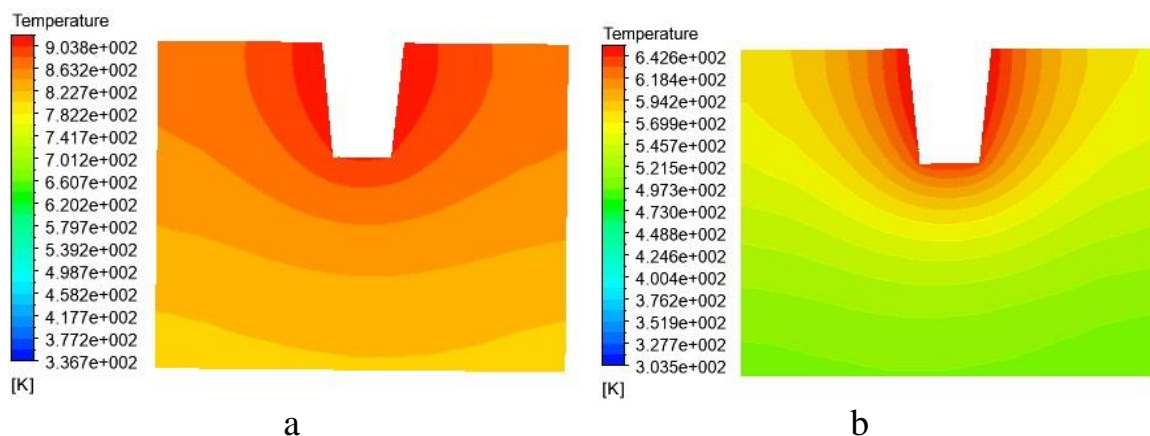


Рис. В.46. Распределение температуры в контрольных сечениях кристаллизатора при  $t_p = 750^\circ\text{C}$ ,  $\tau=210\text{с.}$ , на удалении от места заливки: a –  $\varphi = 30^\circ$ ; b –  $\varphi = 120^\circ$

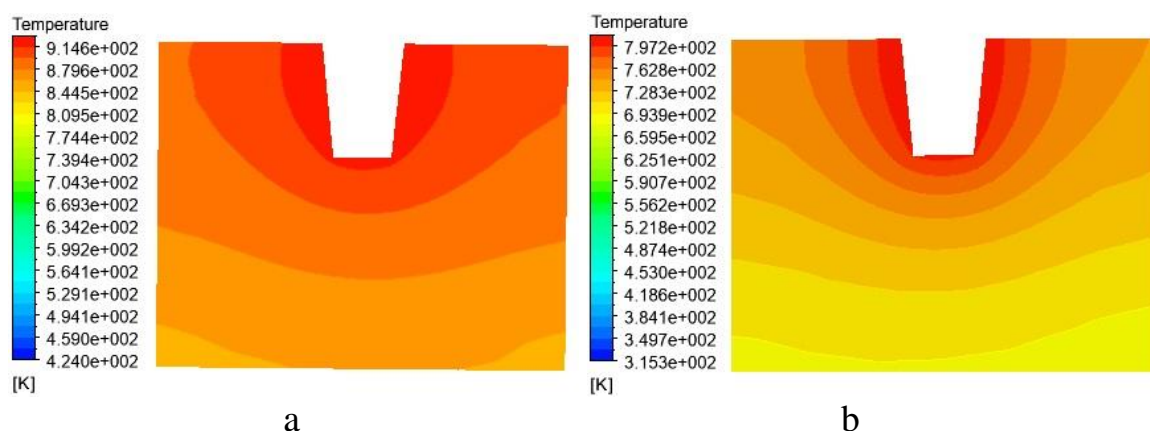


Рис. В.47. Распределение температуры в контрольных сечениях кристаллизатора при  $t_p = 750^\circ\text{C}$ ,  $\tau=300\text{с.}$ , на удалении от места заливки: a –  $\varphi = 30^\circ$ ; b –  $\varphi = 120^\circ$

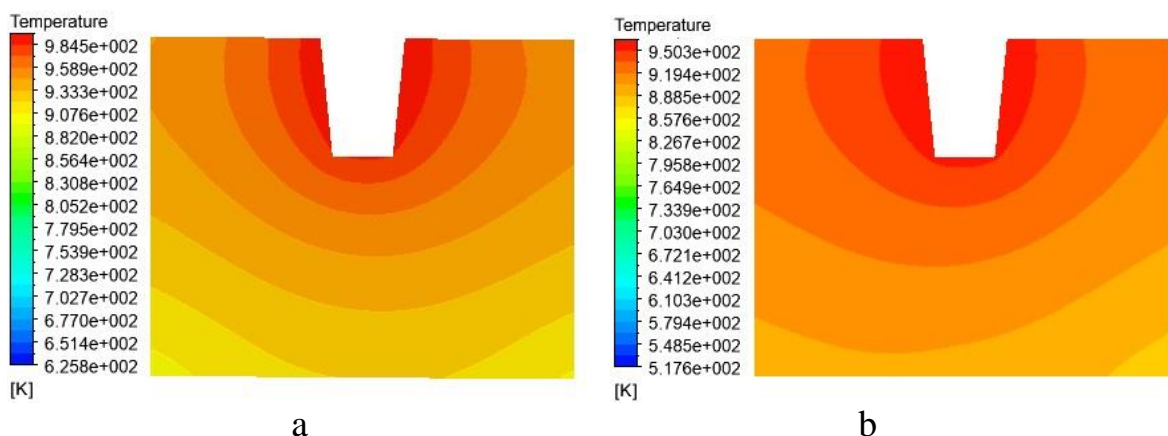


Рис. В.48. Распределение температуры в контрольных сечениях кристаллизатора при  $t_p = 750^\circ\text{C}$  после выхода на стационарный тепловой режим, на удалении от места заливки: a –  $\varphi = 30^\circ$ ; b –  $\varphi = 120^\circ$

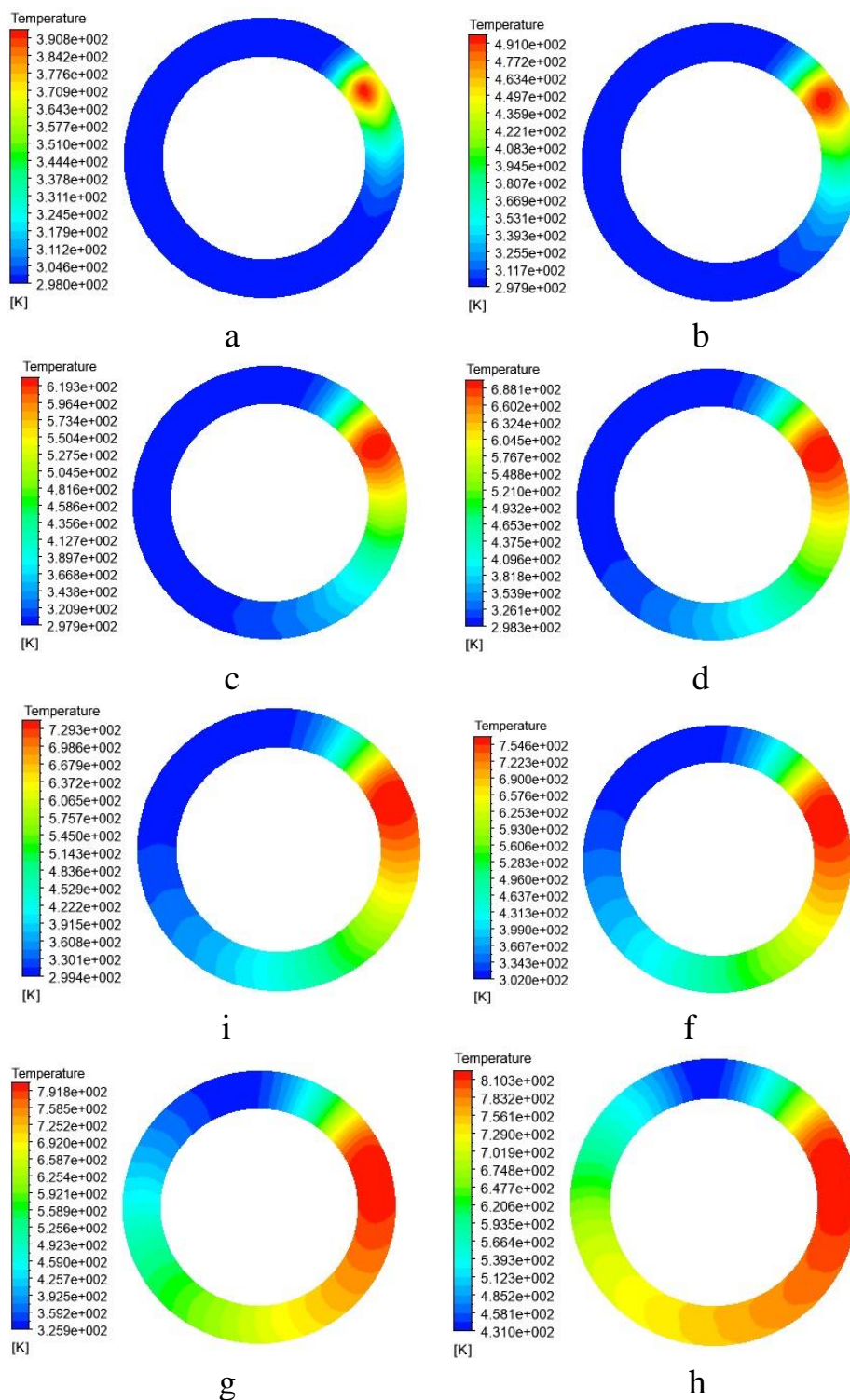


Рис. В.49. Распределение температуры на поверхности кристаллизатора, контактирующей с подшипниками при  $t_p = 635^\circ\text{C}$ :  
 а –  $\tau = 30\text{c.}$ ; б –  $\tau = 60\text{c.}$ ; в –  $\tau = 120\text{c.}$ ; д –  $\tau = 180\text{c.}$ ; е –  $\tau = 240\text{c.}$ ; ф –  $\tau = 300\text{c.}$ ;  
 г –  $\tau = 500\text{c.}$ ; з –  $\tau = 1000\text{c.}$



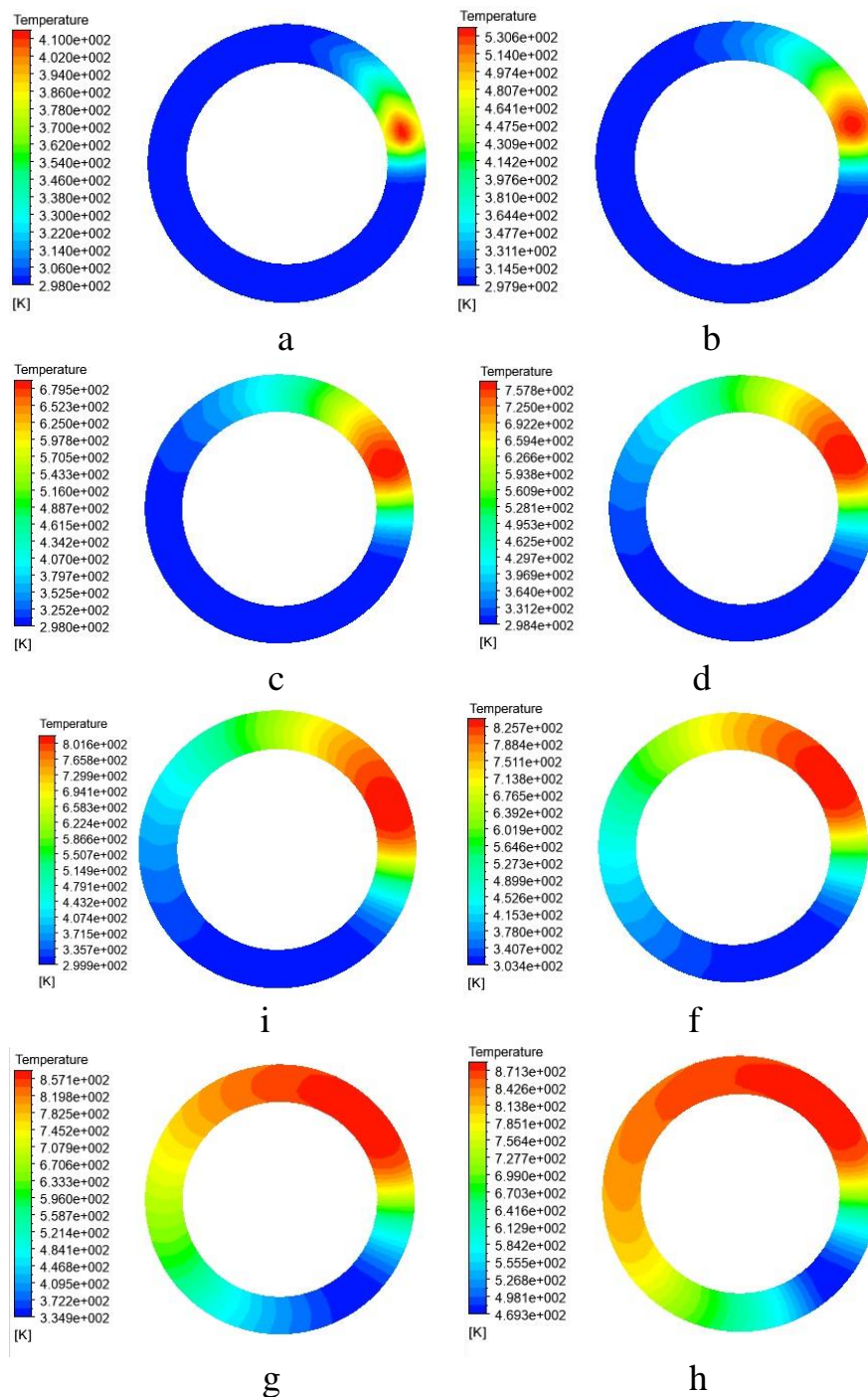


Рис. В.50. Распределение температуры на поверхности кристаллизатора, контактирующей с подшипниками при  $t_p = 690^\circ\text{C}$ :  
 a –  $\tau = 30\text{s}$ .; b –  $\tau = 60\text{s}$ .; c –  $\tau = 120\text{s}$ .; d –  $\tau = 180\text{s}$ .; i –  $\tau = 240\text{s}$ .; f –  $\tau = 300\text{s}$ .;  
 g –  $\tau = 500\text{s}$ .; h –  $\tau = 1000\text{s}$ .

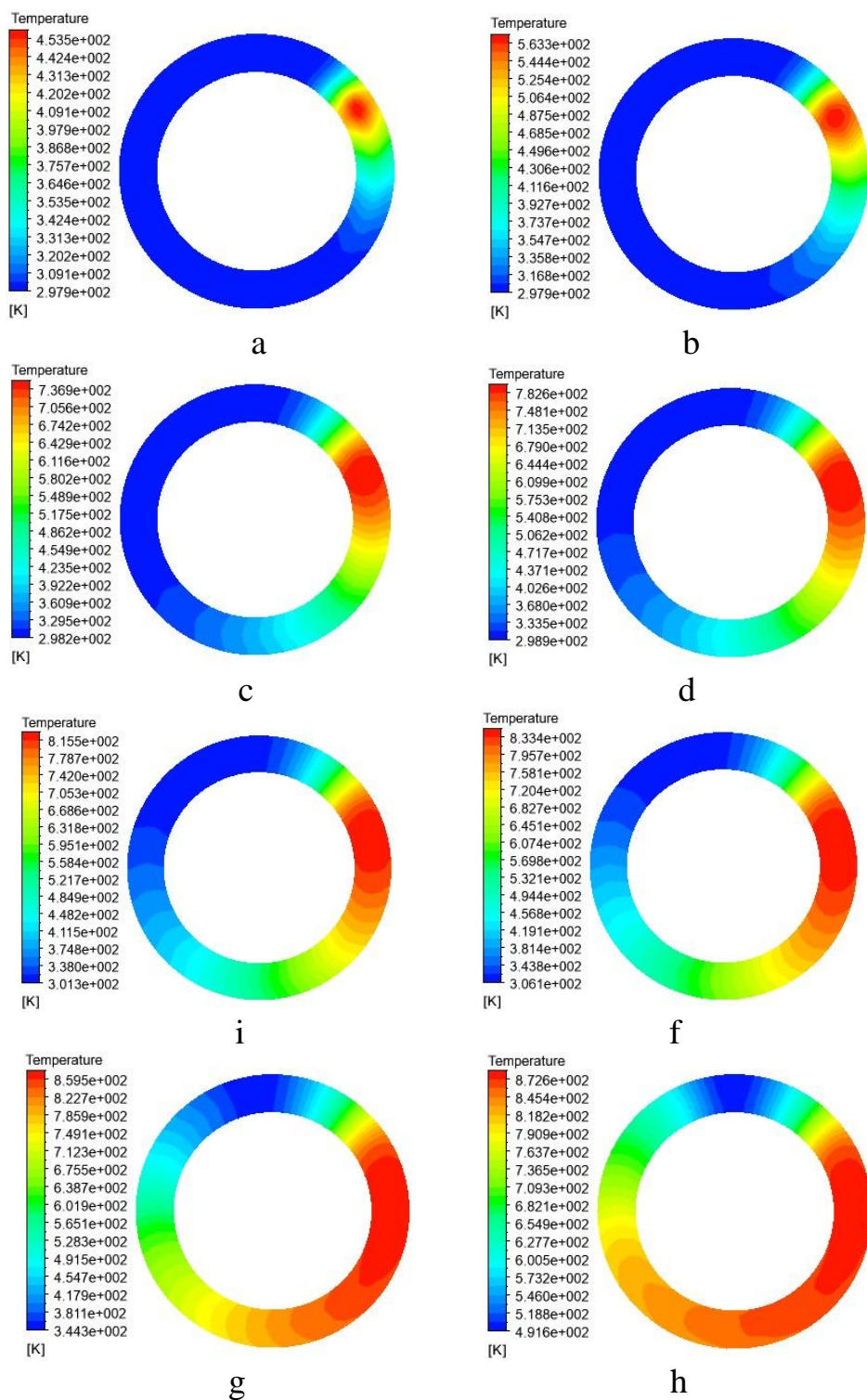


Рис. В.51. Распределение температуры на поверхности кристаллизатора, контактирующей с подшипниками при  $t_p = 750^\circ\text{C}$ :  
 а –  $\tau = 30\text{c.}$ ; б –  $\tau = 60\text{c.}$ ; в –  $\tau = 120\text{c.}$ ; д –  $\tau = 180\text{c.}$ ; и –  $\tau = 240\text{c.}$ ; ф –  $\tau = 300\text{c.}$ ;  
 г –  $\tau = 500\text{c.}$ ; h –  $\tau = 1000\text{c.}$