

На правах рукописи



Потапенко Александр Сергеевич

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

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск, 2018

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Скуратов Александр Петрович

Официальные оппоненты: Кузнецов Гений Владимирович, д-р физ.-мат. наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Инженерная школа энергетики, главный научный сотрудник

Лукин Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Череповецкий государственный университет», кафедра теплоэнергетики и теплотехники, заведующий кафедрой

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН»

Защита диссертации состоится «19» декабря 2018 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07, созданного на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660049, г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. А 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан «__» ноября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 непрерывного совмещенного литья и прессования (НСЛиП) цветных металлов с карусельным горизонтальным кристаллизатором (ГК). Однако на сегодняшний день не создано промышленных образцов установки этой конструкции, которые бы надежно эксплуатировались на рынке производства прессовой продукции. Связано это с тем, что начальный период работы после пуска установки (переходный тепловой процесс) характеризуется нестационарным тепловым состоянием ее элементов, оказывающим существенное влияние на температурно-временные условия затвердевания металла.

Очевидная перспективность процесса НСЛиП цветных металлов в установке с ГК 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 такой установки, обеспечивающих стабилизацию температурных условий процесса затвердевания расплава и дальнейшего его прессования.

Степень разработанности. Теоретическим и экспериментальным исследованиям тепловой работы установок непрерывного литья и деформации посвящены работы Горохова Ю.В., Беяева С.В., Колягина Ю.А., Тимошпольского В.И., Самойловича Ю.А., Лисиенко В.Г., Лукина С.В., Лебедева В.И., Лехова О.С., 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. и др. В работах перечисленных авторов отсутствуют математические модели теплообмена, позволяющие провести детальные теоретические исследования температурно-временных зависимостей с учетом конструктивных особенностей установки с ГК, а также влияния на динамику теплообмена внешних факторов, сопровождающих процесс литья-прессования алюминиевых сплавов различного состава.

Цель работы – совершенствование тепловых процессов в установке непрерывного совмещенного литья и прессования алюминиевых сплавов с карусельным горизонтальным кристаллизатором на основе результатов экспериментального и теоретического исследования тепломассопереноса.

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 тепломассопереноса в опытно-промышленном образце установки.
3. Провести численный анализ теплообмена в переходных режимах работы установки при обработке алюминиевых деформируемых сплавов.
4. Разработать рекомендации по совершенствованию теплового процесса в установке НСЛиП с ГК, обеспечивающего в переходных тепловых режимах требуемый по технологии для данной марки алюминиевого сплава диапазон температур в контрольных сечениях до и после зоны прессования.

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

Предмет исследования – процессы нестационарного тепломассопереноса.

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:

- 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 цветных металлов и сплавов с ГК;

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

Методология и методы исследований состояли в проведении экспериментов на опытно-промышленной установке с применением стандартных сертифицированных средств измерения. Численные исследования проводились с использованием разработанной компьютерной модели теплообмена, построенной на базе лицензионного программного продукта Ansys CFX.

Положения, выносимые на защиту:

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

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

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

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

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.

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.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами, заключения, списка использованных источников из 138 наименований. Работа изложена на 184 страницах, содержит 2 таблицы 131 рисунок и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также приведены методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе представлен анализ современного уровня теории тепловой работы, конструкций и особенностей технологии непрерывного литья и прессования цветных металлов. Представлены и проанализированы существующие конструктивные схемы установок, методы экспериментального и теоретического анализа этих процессов.

Отмечено, что наиболее распространенным в промышленности является способ Conform, предложенный Д. Грином в 1970 году (запатентован United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA) в 1971 году, патент № 1370894 GB) фирмы Outokumpu Holton Ltd. (ранее Holton Machinery Ltd.) и BWE Ltd. (ранее Babcock Wire Equipment) выпускают промышленные установки непрерывного прессования по способу Conform, работающие в комплексе с литейными кристаллизаторами роторного типа.

Отечественный и зарубежный опыт реализации технологии непрерывного литья-прессования металлов показал, что обеспечение надежной и длительной эксплуатации установок в существенной мере зависит от правильного выбора тепловых режимов их работы. Связано это с тем, что температура металла и скорость при прессовании являются главными факторами рациональной технологии ведения процесса прессования. Таким образом, управление формированием качественной структуры при деформации кристаллизующегося металла зависит, главным образом, от правильной организации теплообменных процессов, теория которых применительно к конкретным модификациям устройств непрерывного прессования изучена еще недостаточно.

Одной из эффективных конструкций является устройство, совмещающее непрерывный процесс литья и прессования методом Conform на базе горизонтального карусельного кристаллизатора, разработанное сотрудниками кафедр «Обработки металлов давлением» и «Литейное производство» ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Ими исследован процесс кристаллизации расплава в канавке колеса кристаллизатора и получены аналитические зависимости, позволяющие определить температуру обрабатываемого сплава на выходе из установки. В работах этих авторов численное исследование проводилось в два этапа: для моделирования кристаллизации применен программный комплекс ProCast[®], процесса прессования – Deform-3D[®]. Однако детального изучения температурно-временных закономерностей в нестационарных условиях не проводилось, что не дает возможность научно обоснованно подойти к выбору рациональных конструкции и режимов работы данной установки, обеспечивающих ее эксплуатационную надежность.

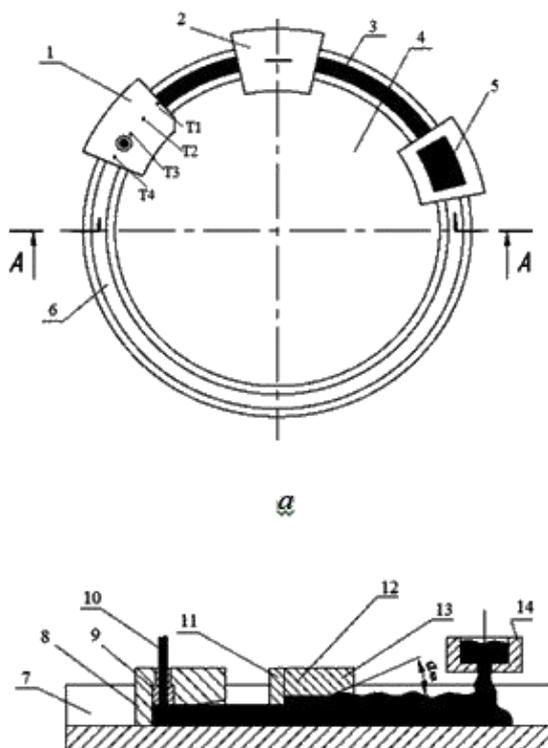
На основе проведенного обзора отечественных и зарубежных источников отмечено, что теория тепловой работы установок с горизонтальным кристаллизатором в переходных режимах изучена еще не достаточно, поэтому разработка их рациональных конструкций и промышленное внедрение встречает значительные трудности.

Показано, что в настоящее время, в связи с развитием вычислительной техники и созданием современных программных продуктов, при решении задачи многофакторного исследования нового технического объекта стало возможным широкое применение такого вида теоретического исследования, как компьютерное моделирование.

В результате анализа имеющихся литературных источников определены задачи диссертационного исследования.

Во второй главе приводится описание опытно-промышленной установки, характеристики исследуемого технического алюминия АД0 и его сплавов АК12 и АД31, методика проведения и результаты экспериментальных исследований.

Согласно схеме, приведенной на рисунке 1, реализация технологического процесса происходит в следующей последовательности: расплавленный металл 5 заливается через дозатор 14 в канавку 6 вращающегося колеса-кристаллизатора 4 и кристаллизуется до входа в контейнер, образованный на участке сопряжения ручья с неподвижным дугообразным сегментом 1. Затвердевший сплав доходит до выступа 8, распрессовывается и выдавливается в отверстие матрицы 9 в виде пресс-изделия 10.



b

c

Рисунок 1 – Схема опытно-промышленной установки непрерывного совмещённого литья и прессования цветных металлов и сплавов с горизонтальным карусельным кристаллизатором:
a – вид сверху: 1 – основной неподвижный дугообразный сегмент; 2 – промежуточная неподвижная сегментная вставка; 3 – зона кристаллизации металла; 4 – кристаллизатор; 5 – дозатор; 6 – кольцевая канавка; T_1 , T_2 , T_3 и T_4 – датчики температуры в теле дугообразного сегмента; *b* – вид сбоку: 7 – кольцевая канавка; 8 – выступ; 9 – матрица; 10 – пресс-изделие; 11 – выступ; 12, 13 – участки промежуточной неподвижной сегментной вставки; 14 – дозатор;
c – общий вид установки

В результате экспериментов определены температурно-временные зависимости затвердевания алюминиевых расплавов в переходном тепловом режиме и выявлены пять теплотехнических зон, характеризующихся различной степенью теплообмена в период от холодного пуска до момента стабилизации температуры всех ее элементов: внешнего

подвода теплоты; кристаллизации металла; прессования металла; конвективного теплообмена кристаллизатора с окружающей средой; контакта движущегося кристаллизатора с подшипниками.

Установлено, что с каждым оборотом кристаллизатора происходит постепенное увеличение энтальпии расплава. Поэтому при определенной температуре заливки расплава t_p может не произойти его фазовый переход в твердое состояние перед зоной прессования.

Определены зависимости длины дуги затвердевания алюминиевого расплава от времени работы установки. На рисунке 2, в качестве примера, показана полученная зависимость температуры затвердевающего расплава АК12 от угла поворота кристаллизатора φ . Видно, что с каждым оборотом установки кривые изменяют свой угол наклона в сторону горизонтальной прямой, соответствующей температуре фазового перехода. Выше указанной линии расплав находится в жидкой фазе, ниже – в твердой фазе.

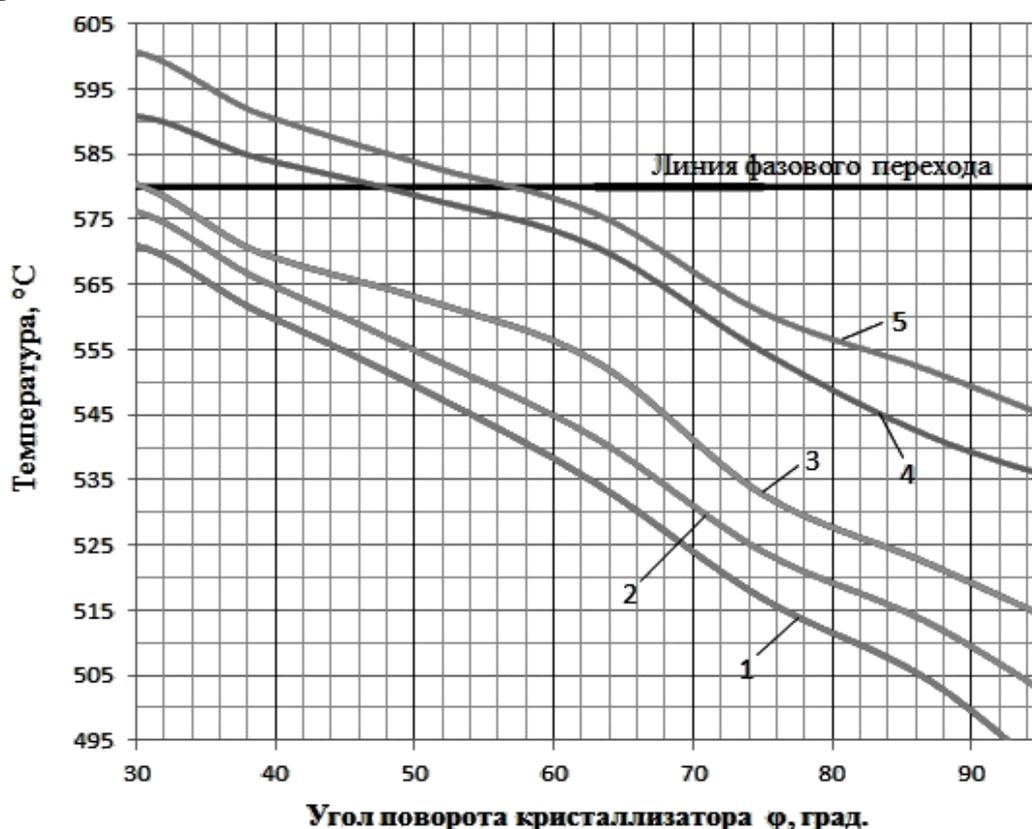


Рисунок 2 – Динамика изменения температуры затвердевающего расплава АК12 при различном угле поворота кристаллизатора:
линии 1, 2, 3, 4 и 5 – соответственно 1, 2, 3, 4 и 5 оборотов кристаллизатора

Анализ показывает, что в начальный момент времени, соответствующий запуску установки, расплав в результате теплового взаимодействия с холодным кристаллизатором мгновенно затвердевал (см. рисунок 1, кривая 1). Однако через 139 с ее работы переход расплава из жидкой фазы в твердую фазу происходит уже на удалении от места заливки, соответствующего углу поворота кристаллизатора 57° (кривая 5). Связано это с тем, что в условиях переходного теплового режима в зоне кристаллизации 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, что вызывает соответствующее изменение угла затвердевания расплава φ_s .

Установлено, что, несмотря на постоянный внешний подвод теплоты от расплава, имеет место постепенное падение температуры подставки (до 426 °С в конце пятого оборота кристаллизатора). В результате на стенках выходного сечения дозатора происходило затвердевание расплава, приводящее вначале к сужению, а затем и полному перекрытию отверстия дозатора. Поэтому для обеспечения работоспособности установки в нестационарном режиме требуется дополнительный подвод теплоты к дозатору в первой теплотехнической зоне.

Третья глава посвящена разработке трехмерной компьютерной модели сложного теплообмена при НСЛиП цветных металлов и сплавов в установке с ГК. В качестве инструмента численного исследования был выбран программный комплекс Ansys CFX 17.1 с использованием программного продукта SolidWorks 2017 (рисунок 3).

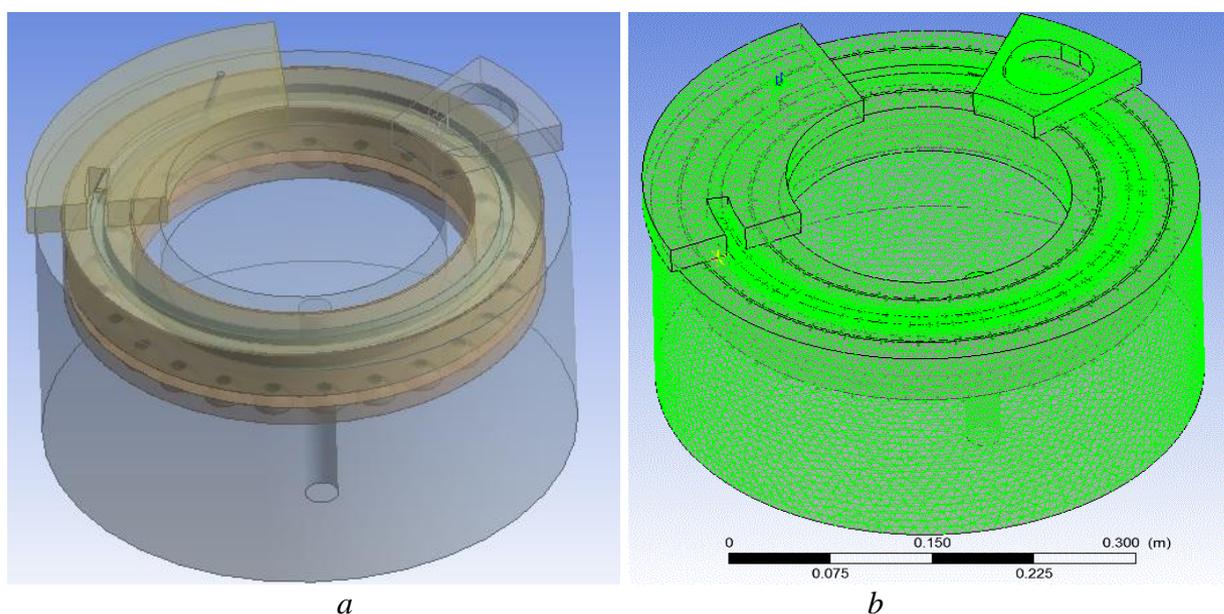


Рисунок 3 – Трехмерная компьютерная модель установки НСЛиП с ГК:
a – геометрия установки; *b* – расчетная сетка контрольных объемов

Для создания расчетной сетки контрольных объемов, модель установки разбивалась на 8 доменов: корпус (*CORPUS*), кристаллизатор (*CRISTALLYZER*), изоляционный слой (*INSULATOR*), дугообразный сегмент с матрицей (*MATRIX*), подставка дозатора (*PODSTAVKA*), воздушная прослойка между кристаллизатором и корпусом (*SOLIDAIR*). Домен обрабатываемого расплава разделен на две части: (*GROVE*) – участок от места заливки до дугообразного сегмента с матрицей (зона кристаллизации) и (*GROVE2*) – участок обрабатываемого металла, находящегося под дугообразным сегментом (зона прессования). Размер сетки в итоговом расчете всей модели составил 3,7 млн. ячеек. Сетка строится в автоматическом режиме по следующим правилам: между доменами внутри расчетной области узлы стыкуются по правилу «узел-в-узел». Размер ячейки внутри доменов «*GROOVE*» и «*GROOVE2*», содержащих жидкую фазу, составляет 0,8 мм. Пристеночный слой размещается при помощи 10 ячеек на расстоянии 2 мм от стенки с коэффициентом роста 1,2. Конфигурация сетки внутри домена с жидкой фазой подбиралась минимальной. Воздух в зазорах между вращающейся частью установки и корпусом моделировался твердым доменом с материалом «*SOLIDAIR*», в котором решается только уравнение

теплопроводности. В домене «*SOLIDAIR*» теплопроводность, плотность и теплоемкость материала соответствуют теплофизическим параметрам воздуха, коэффициент теплопередачи включает конвективную и лучистую составляющие теплообмена.

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

$$\rho_i c_i(T) \frac{dT_i}{d\tau} = \rho_i c_i(T) \frac{\partial T_i}{\partial \tau} + \rho_i c_i(T) w_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = \nabla(\lambda_i(T) \nabla T_i) + q_{\text{вн } i}, \quad (1)$$

где $T_i = T_i(x, y, z, \tau)$ – поле температур в i -ом элементе; ρ_i , c_i и λ_i – плотность, объемная теплоемкость и теплопроводность i -го элемента; w_i – скорость движения i -го элемента вдоль вертикальной оси Z ; $q_{\text{вн } i}(x, y, z, \tau)$ – внутреннее тепловыделение при фазовом переходе в i -ом элементе.

Уравнение (1) дополняется краевыми условиями:

$$T_i = T(x, y, z, \tau = 0) = T_{0i}(x, y, z); \lambda \frac{\partial T}{\partial n} |_{\Gamma} = \pm q_i, \quad (2)$$

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

Внутреннее тепловыделение при фазовом переходе характерно для домена с металлом «*GROOVE*» и «*GROOVE2*», для остальных элементов $q_{\text{вн } i} = 0$. Скорость движения относительно оси Z присуща вращающимся элементам изучаемой системы: кристаллизатора «*CRISTALLYZER*» и металла «*GROOVE*». Для остальных элементов $w_i = 0$. Так как расплав проходит две теплотехнические зоны (кристаллизации расплава и прессования), то величина $q_{\text{вн } i}$ в уравнении (1) будут иметь вид:

$$q_{\text{вн } i} = S'_h + S''_h, \quad (3)$$

где S'_h – внутреннее тепловыделение при фазовом переходе (учитывается при решении уравнения теплопроводности в домене «*GROOVE*» и «*GROOVE2*»); S''_h – тепловыделение от сил контактного трения и сил деформации обрабатываемого металла (учитывается при решении уравнения теплопроводности в домене «*GROOVE2*»).

В общем виде значение S'_h определяется выражением:

$$S'_h = \int_{T_{\text{liq}}}^{T_{\text{sol}}} c_p(T) dT + L. \quad (4)$$

В модели теплота затвердевания L отдельно не учитывалась, а включалась в величину эффективной теплоемкости $c_{\text{эф}}$. Эта величина является разрывной энергетической характеристикой тепловых процессов с фазовыми переходами, зависящей в кристаллизующейся зоне от доли твердой фазы ψ . Отметим, что для уточнения решаемой задачи в уравнение (1) вводится величина эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$, которая также считается функцией ψ .

Тепловыделение от сил контактного трения и сил деформации обрабатываемого металла учитывалось в модели путем добавления объемного источника теплоты:

$$S''_h = q_{\text{тр}} + q_{\text{д}}. \quad (5)$$

Здесь $q_{\text{тр}}$ – тепловыделение от преодоления сил контактного трения с неподвижным инструментом и стенками кристаллизатора (поверхностный источник тепловыделений); $q_{\text{д}}$ – тепловыделение от работы пластической деформации (объемный источник тепловыделений).

Анализ показывает, что наиболее адекватно эксперименту отвечает характер полученной расчетной зависимости угла затвердевания в кристаллизаторе внешней поверхности расплава $\varphi_s^{\text{пов}}$ в период переходного теплового режима $\tau_{\text{пр}}$.

На рисунке 4 представлены расчетные температурные поля кристаллизатора при скорости его вращения 2 об/мин, позволяющие судить об изменении длины дуги затвердевания расплава φ_s в зависимости от времени работы установки при t_p опытного сплава АК12 750 °С. Маркером на рисунке обозначено место в канавке кристаллизатора, где максимальный уровень температуры по сечению металла в соответствии с технологическими условиями его дальнейшего прессования не превышает точку солидуса t_s . Результаты моделирования были обобщены в виде зависимости угла затвердевания расплава φ_s от времени работы установки в переходном тепловом режиме (рисунок 5).

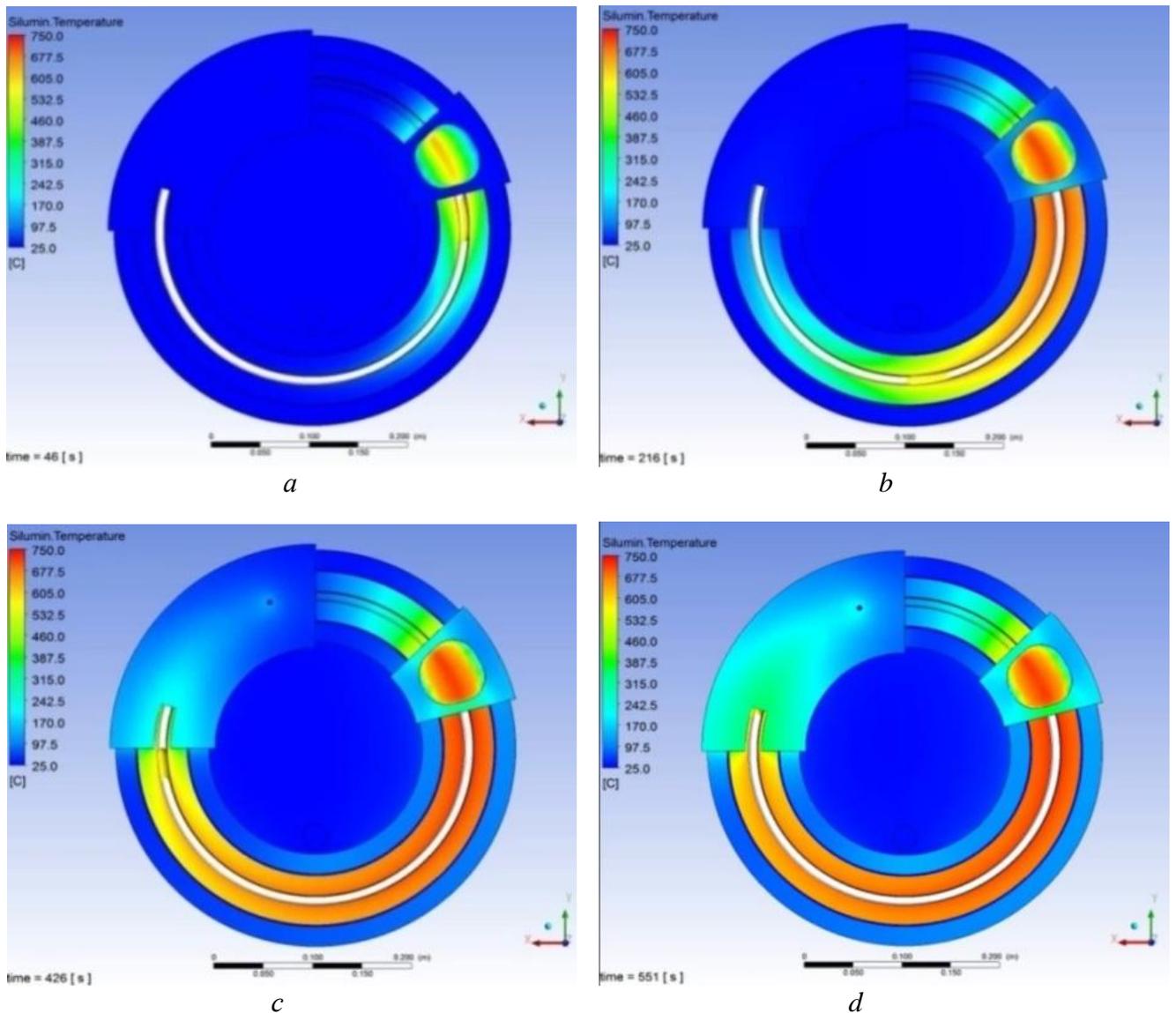


Рисунок 4 – Изменение длины дуги затвердевания расплава в зависимости от времени работы установки:
a – 46 с; *b* – 216 с; *c* – 426 с; *d* – 551 с

Расчеты показывают, что на 139 с работы установки фазовый переход расплава АК12 из жидкого состояние в твердое происходит на удалении от места заливки $\varphi_s =$

60°, т.е. для заданных условий максимальная погрешность моделирования функции $\varphi_s^{\text{пов}} = f(\tau_{\text{пр}})$ составила 5,3 %.

На базе программного продукта Ansys CFX разработана трехмерная математическая модель инженерного расчета теплообмена в установке НСЛиП с ГК при литье-прессовании различных деформируемых цветных металлов. В модели введен ряд упрощений: отсутствуют корпус установки, дугообразный сегмент, под которым происходит процесс прессования металла, и тигель с дозатором, через который заливается расплав, а также некоторые другие элементы. Программа позволяет выполнять экспресс-расчеты угла затвердевания расплава φ_s в зависимости от времени ее работы, а также оценить динамику температуры обрабатываемого расплава в сечении канавки колеса кристаллизатора.

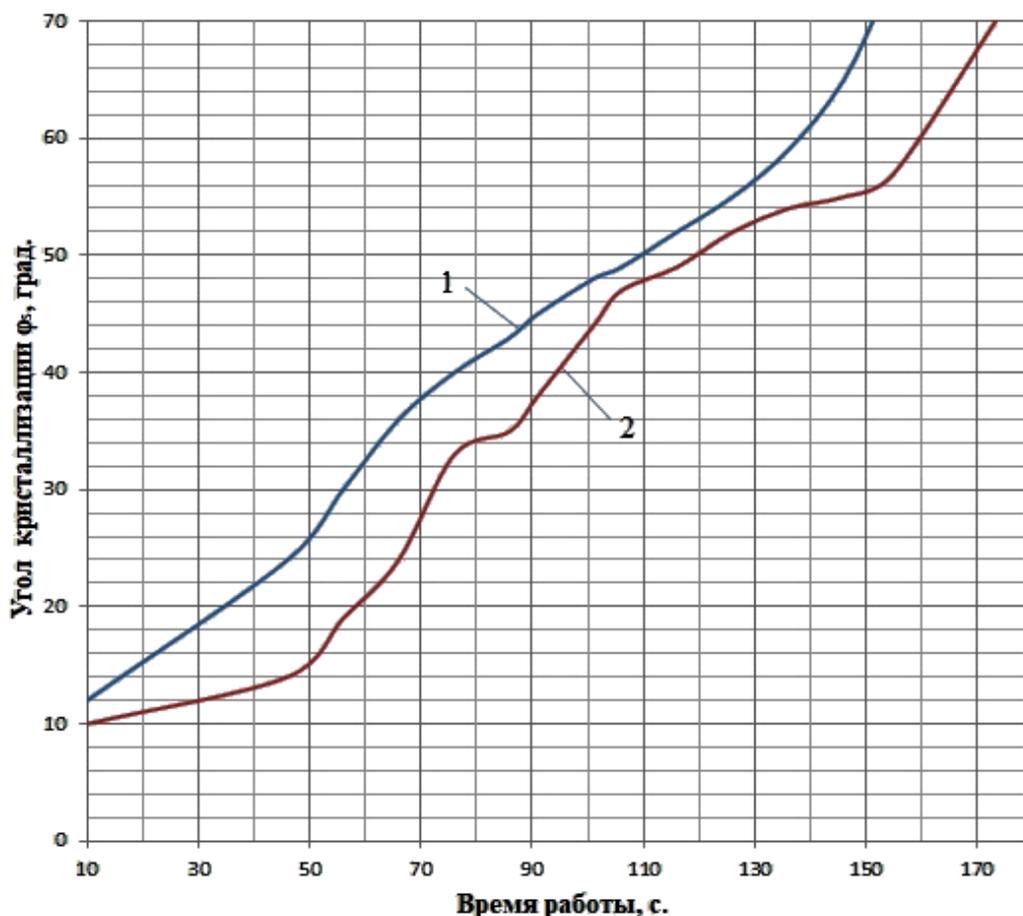


Рисунок 5 – Динамика изменения угла затвердевания φ_s расплава АК12:
1 – расчет; 2 – эксперимент

Четвертая глава посвящена численному исследованию нестационарного теплообмена в установке НСЛиП с ГК. Детальный анализ тепловых процессов проведен при различных температурах заливки t_p опытного алюминиевого сплава АК12.

Установлено, что в переходном тепловом режиме возрастает несимметричность температурного поля затвердевающего расплава, которое в контрольном сечении вблизи камеры прессования характеризуется сдвигом области с максимальной температурой к контактирующей поверхности кристаллизатора (рисунок 6). Распределение температур по ширине тела карусельного горизонтального кристаллизатора имеет характерный

максимум в области расположения канавки с расплавом. По мере прогрева кристаллизатора перепад температур по его ширине постепенно снижается.

Получены количественные зависимости продолжительности переходного теплового процесса от температуры заливаемого расплава. Так, увеличение температуры перегрева расплава от 635 до 750 °С приводит к возрастанию на десять минут времени выхода установки на стационарный тепловой режим $\tau_{ст}$, т.е. прирост величины $\Delta t_{ст}$ составляет в среднем одну минуту на каждые 10 °С перегрева заливаемого расплава.

Определен максимальный температурный предел перегрева заливаемого металла, равный 670-675 °С, выше которого при реализации технологии непрерывного совмещенного литья и прессования в установке данной конструкции алюминиевый расплав не затвердевает в кристаллизаторе, попадает под камеру прессования в жидкой фазе и требует организации принудительного охлаждения кристаллизатора. В частности, перегрев заливаемого алюминиевого сплава АК12 над температурой его плавления Δt_p^{max} не должен превышать 95 °С.

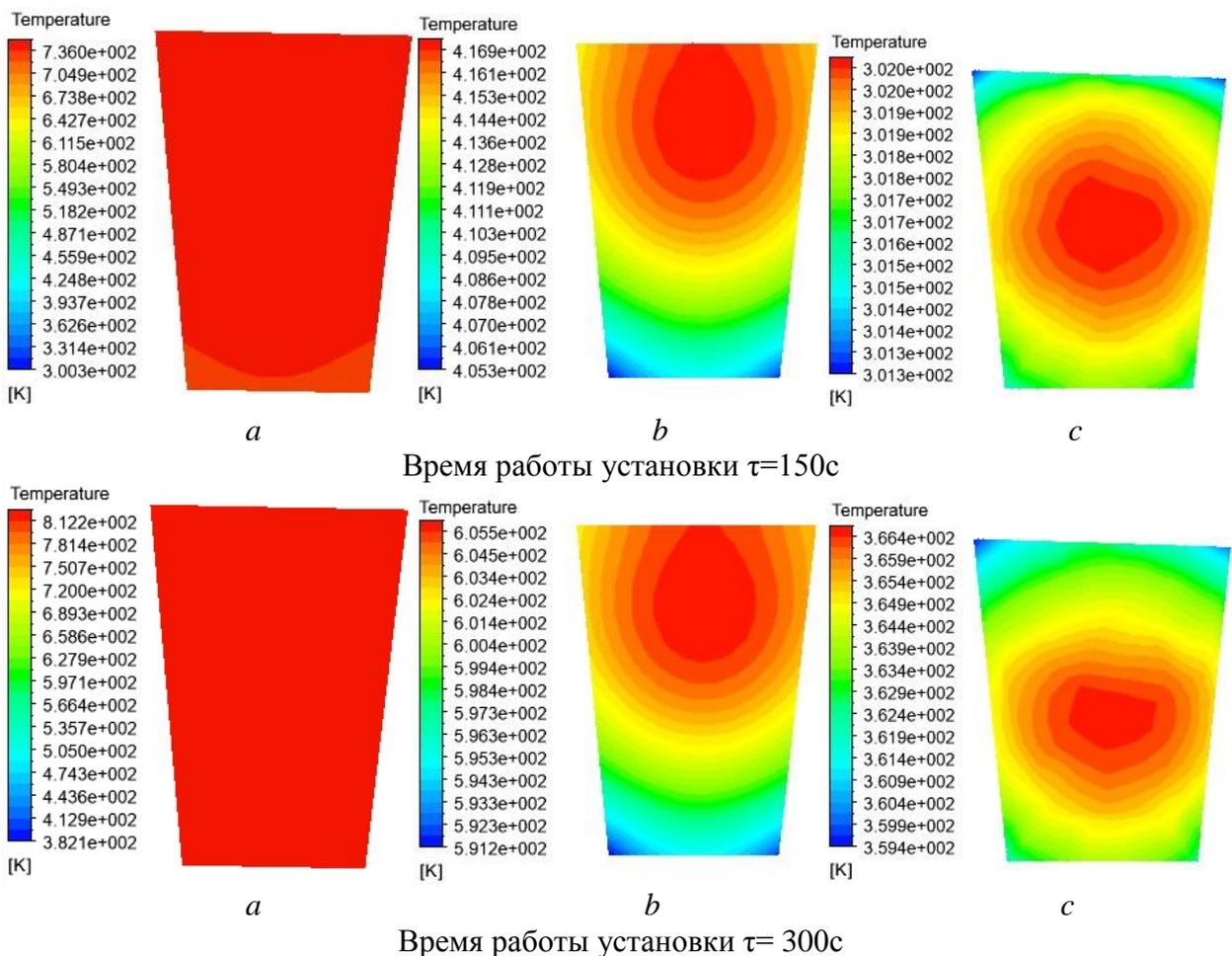


Рисунок 6 – Распределение температуры в контрольных сечениях φ при $t_p = 635$ °С:
 $a - \varphi = 30^\circ$; $b - \varphi = 120^\circ$ $c - \varphi = 210^\circ$

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 (рисунок 7). Поэтому для стабилизации температурных условий в установке

необходимо осуществлять отбор излишней теплоты от дугообразного сегмента в зоне расположения датчиков температуры $T1$, $T2$ и $T4$ (см. рисунок 1).

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 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ и снизить эксплуатационную надежность установки.

Показано, что установка теплоизоляционной вставки под внутренней поверхностью разогретого кристаллизатора позволяет при высоком перегреве заливаемого расплава обеспечить в период переходного теплового процесса значение рабочей температуры подшипников, не превышающей их предельно допустимого уровня. Так, согласно расчетам, наличие теплоизоляционной вставки под внутренней поверхностью кристаллизатора позволяет при $t_p = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ уменьшить температуру подшипников в момент выхода установки на стационарный тепловой режим до $176\text{ }^{\circ}\text{C}$.

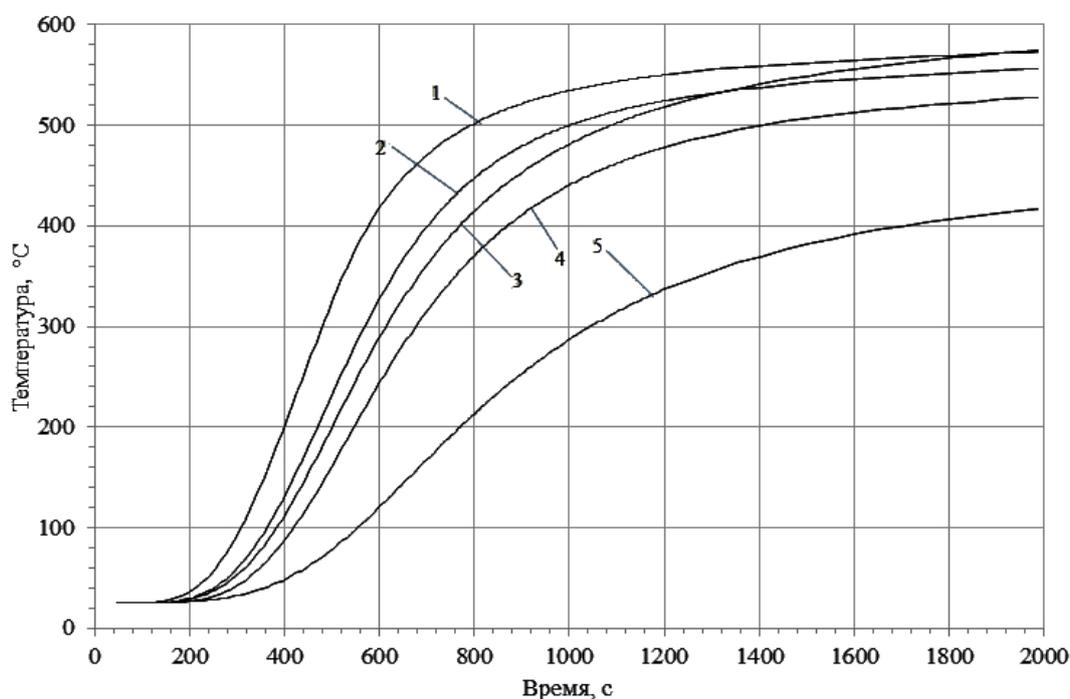


Рисунок 7 – Изменение температуры дугообразного сегмента и обрабатываемого расплава на выходе из матрицы в переходном тепловом режиме установки для сплава АК12 ($t_p = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$): 1, 2, 4 и 5 – температура в теле дугообразного сегмента соответственно в датчиках $T1$, $T2$, $T3$ и $T4$; 3 – температура обрабатываемого расплава на выходе из матрицы

Пятая глава посвящена разработке конструкции и режимов работы установки с водяным охлаждением, выполненной на основе расчётно-теоретического исследования.

На рисунке 8 представлена компьютерная модель установки с предложенной водяной системой охлаждения.

В дополнение к ранее разработанной математической модели установки (глава 3) были включены следующие домены: «*WATER1*» – змеевик, расположенный на дугообразном сегменте и содержащий 382000 элементов; «*WATER2*» и «*WATER3*» – кольцевые профилированные каналы, расположенные в корпусе на внутренней и внешней стороне относительно подшипников и состоящие соответственно из 135000 и 102000 элементов. При моделировании переноса хладагента решаются уравнения Навье-Стокса, сохранения массы и импульса. При моделировании теплопереноса в системе «вода – твердое тело» во всех доменах «*WATER*» решается уравнение энергии с конвективными членами.

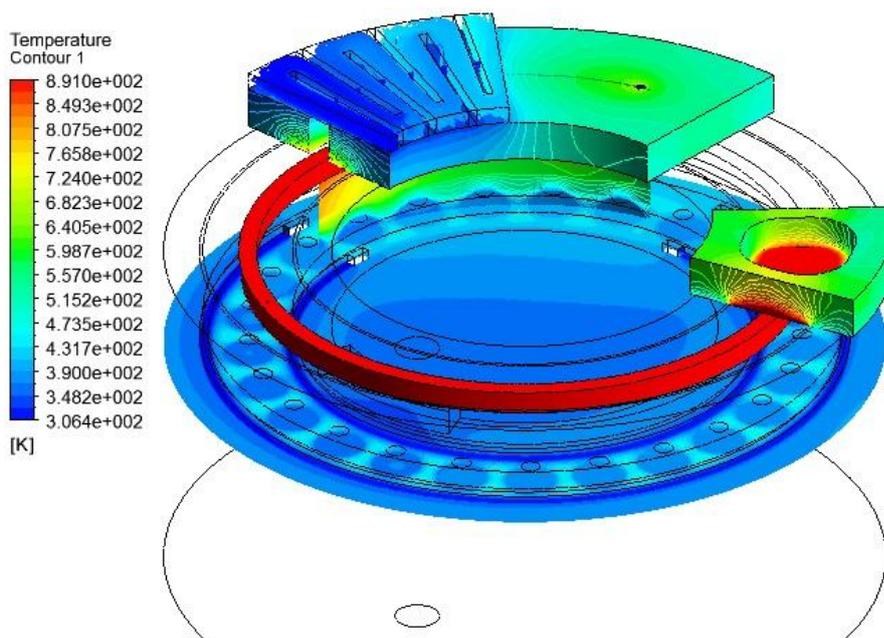


Рисунок 8 – Компьютерная модель установки НСЛиП с ГК и двухзонной водяной системой охлаждения

В результате расчетов предложено внести ряд изменений в конструкцию установки: между кристаллизатором и подшипниками выполнить изоляционную прослойку из оксидалюминиевой керамики; установить в корпусе рядом с подшипниками кольцевые профилированные каналы шириной 5 и высотой 10 мм из стали толщиной 1 мм, по которым противотоком (против хода кристаллизатора) будет циркулировать хладагент; установить на дугообразном сегменте теплообменник, обеспечивающий компенсацию теплоты, образующуюся в процессе прессования металла.

На рисунке 9 показан разработанный режим работы системы охлаждения при непрерывном совмещенном литье и 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 (линия 1). Максимальный расход воды в профилированных каналах достигается при прогреве нижней поверхности изоляционного слоя в зоне заливки расплава до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определено, что при температуре заливки расплава $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, требуется организовать суммарный отбор тепловой энергии от элементов установки в количестве 61,75 кВт.

Расчеты показывают, что при таком режиме охлаждения угол между затвердевшим сечением расплава и дугообразным сегментом составляет 10° , т.е. полностью исключается возможность попадания жидкой фазы в зону прессования. При этом рабочая температура в зоне контакта подшипников с изоляционным слоем не превышает $180\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Разработано устройство терморегулирования, позволяющее регулировать скорость вращения кристаллизатора и, таким образом, производить коррекцию температурного режима установки. Колесо-кристаллизатор и дугообразный сегмент с матрицей для прессования снабжены коллекторами для подвода и отвода хладагента и

частотным преобразователем, взаимосвязанным с датчиками температуры, установленными на дозаторе, на неподвижном дугообразном сегменте и на выходных патрубках циркуляции хладагента. Кроме того, кристаллизатор со стороны подшипников снабжен изоляционной вставкой. При совместной работе с водяной системой охлаждения такое устройство позволяет вывести установку на стационарный тепловой режим без нарушения технологического регламента.

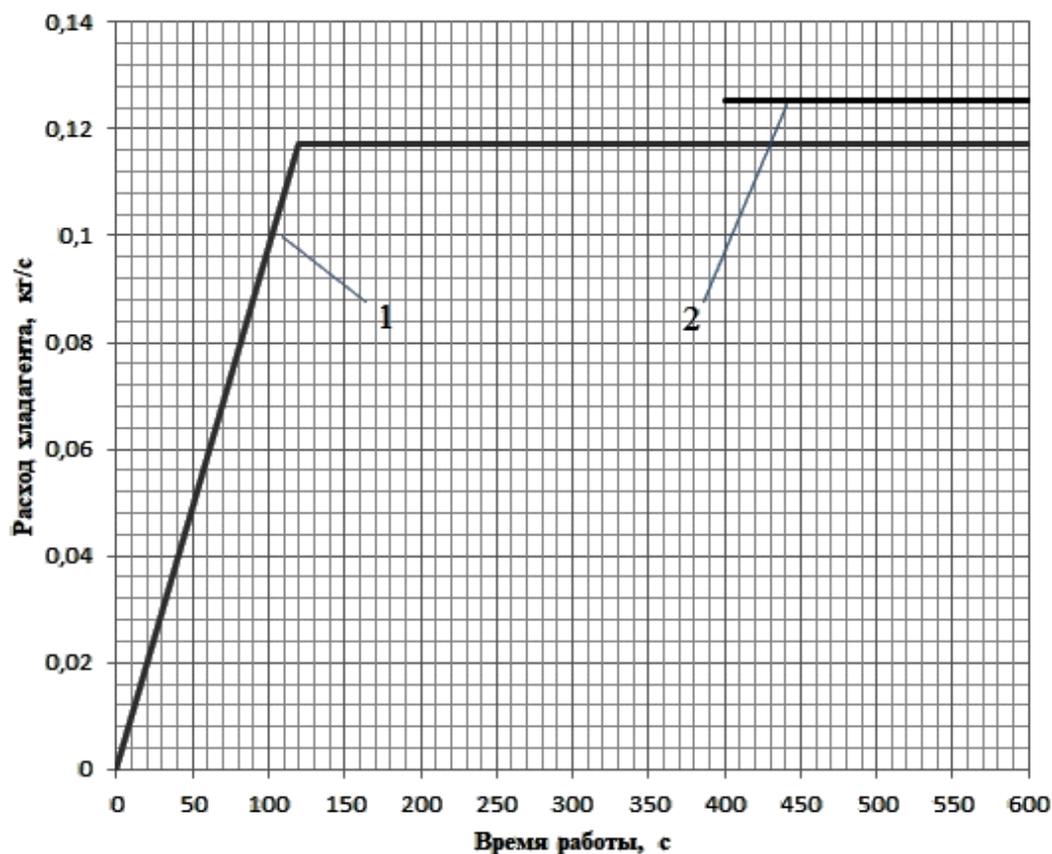


Рисунок 9 – Режим работы системы охлаждения при обработке сплава АК12:
1 – расход в профилированных каналах; 2 – расход в змеевике-теплообменнике

Разработано и запатентовано устройство управления тепловым режимом установки НСЛиП с ГК, позволяющее в нестационарных условиях регулировать длину дуги кристаллизации металла в зависимости от температуры заливаемого расплава и изменяющегося во времени характера и интенсивности теплообмена. Дополнительно к приведенной выше системе терморегулирования основание дозатора в установке оснащается роликами и имеет возможность перемещения, устанавливается контроллер взаимосвязанный с электроприводом дозатора и размещенными в нем и на неподвижном дугообразном сегменте датчиками температуры.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведены экспериментальные исследования тепловой работы опытно-промышленной установки с горизонтальным карусельным кристаллизатором при НСЛиП алюминия и его сплавов. Показано, что выход на стационарный тепловой режим сопровождается постепенным увеличением энтальпии металла с каждым оборотом

кристаллизатора. При этом для обеспечения работоспособности установки в переходном режиме требуется дополнительный подвод теплоты к дозатору заливаемого расплава.

2. Разработана компьютерная модель нестационарного тепломассопереноса в установке НСЛиП цветных металлов и сплавов с горизонтальным карусельным 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 математическая модель и 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 камеры прессования характеризуется сдвигом области с максимальной температурой к поверхности кристаллизатора;

- время выхода установки на стационарный тепловой режим возрастает в среднем на одну минуту на каждые 10 °С перегрева заливаемого расплава;

- определен максимальный температурный предел перегрева алюминиевых расплавов 670-675 °С, при превышении которого металл попадает под камеру прессования в жидкой фазе, что требует организации принудительного охлаждения элементов установки. Так, перегрев заливаемого сплава АК12 над температурой его плавления не должен превышать 95 °С.

5. Предложено установить теплоизоляционный слой между кристаллизатором и подшипниками, позволяющий при высоком перегреве заливаемого расплава обеспечить в период переходного теплового процесса значение рабочей температуры подшипников, не превышающей их предельно допустимого значения (180 °С).

6. Предложена конструкция системы 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 камеры прессования при обработке сплава АК12. Определено, 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».

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Дальнейшее развитие исследований целесообразно вести в направлении более детального учета в математической модели сил контактного трения и деформации металла в зоне прессования, а также оптимизации конструктивных и режимных параметров, обеспечивающих нормальный технологический процесс литья-прессования деформируемых алюминиевых сплавов различного состава.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК

1. 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.

2. **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.

3. **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. – № 10. – С. 122-130.

4. 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.

Статьи, проиндексированные в международной базе Scopus

5. 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.

6. Gorokhov, Y.V. Wheel and shoe forced cooling at conform installations / Y.V. Gorokhov, S.V. Belyaev, A.P. Skuratov., I.Yu. Gubanov, I.V. Uskov, V.I. Kirko, E.M. Lesiv, **A.S. Potapenko**, N.P. Koptseva, N.B. Erdyneev // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. – Vol. 13. – No 7. – PP. 2661-2665.

Публикации в трудах научно-технических конференций

7. **Потапенко, А.С.** Моделирование теплового процесса в установке совмещенного литья и прессования цветных металлов /А.С. Потапенко, А.П. Скуратов, А.А. Пьяных // Молодежь и наука: сборник материалов X Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, Красноярск 15-25 апреля 2014 [электронный ресурс]. –

Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014.

8. Скуратов, А.П. Расчетное исследование теплового режима установки совмещенного литья и прессования цветных металлов / А.П. Скуратов, Ю.В. Горохов, **А.С. Потапенко** // Сб. докладов VI Международного конгресса «Цветные металлы и минералы», Красноярск 15-18 сентября 2014. – Красноярск: Изд-во «Версо», 2014. С. 336–342.

9. Храмцов, П.А. Тепловой расчет зоны кристаллизации расплава при непрерывном литье-прессовании металла / П.А. Храмцов, **А.С. Потапенко**, Ю.В. Горохов, А.П. Скуратов // Материалы научной конференции, посвященной 70-летию Великой Победы, Красноярск 15-25 апреля 2015 [электронный ресурс]. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015.

10. Скуратов, А.П. Применение САД-систем при моделировании тепловых процессов в установке совмещенного литья и прессования цветных металлов и сплавов / А.П. Скуратов, Ю.В. Горохов, **А.С. Потапенко** // Труды IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах», Новокузнецк 12-15 апреля 2016. – Новокузнецк: СибГИУ, 2016. С. 154-158.

11. **Потапенко, А.С.** Моделирование теплообмена в элементах установки непрерывного литья и прессования цветных металлов / А.С. Потапенко, А.П. Скуратов, Ю.В. Горохов // III международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы науки и техники», Самара 11 апреля 2016. – Самара: Изд-во ИЦРОН, 2016. С. 79-82.

12. **Потапенко, А.С.** Использование энергосберегающих технологий в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов / А.С. Потапенко, Н.П. Попиякова, А.П. Скуратов // Материалы международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: перспектив Свободный», Красноярск 15-25 апреля 2016 [электронный ресурс]. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016.

13. **Потапенко, А.С.** Повышение экологической безопасности работы установки непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов / А.С. Потапенко, Н.П. Попиякова, А.П. Скуратов // Материалы международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: перспектив Свободный», Красноярск 15-25 апреля 2016 [электронный ресурс]. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016.

14. **Потапенко, А.С.** Анализ теплообмена в системе металл-инструмент при литье и прессовании цветных металлов и сплавов / А.С. Потапенко, А.П. Скуратов, Н.П. Попиякова // Материалы XXV международной научно-практической конференции «Достижения вузовской науки», Новосибирск 23 ноября 2016 [электронный ресурс]. – Новосибирск, 2016. С. 82-86.

15. **Потапенко, А.С.** Стабилизация тепловой работы установки непрерывного литья и прессования / А.С. Потапенко, Н.П. Попиякова, А.П. Скуратов // Материалы международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: перспектив Свободный», Красноярск 15-25 апреля 2017 [электронный ресурс]. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017.

16. **Потапенко, А.С.** Повышение надежности работы установки непрерывного литья и прессования на основе математического моделирования процессов теплообмена / А.С. Потапенко, А.П. Скуратов, Н.П. Попиякова // Труды II Международной научно-практической конференции «Современные научные достижения металлургической

теплотехники и их реализация в промышленности», Екатеринбург 18-21 сентября 2017 [электронный ресурс]. – Екатеринбург: Ур. федер. ун-т, 2017.

*Патенты и свидетельства о государственной регистрации программ
для ЭВМ и базы данных*

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614574 РФ. Расчет температурных полей при кристаллизации расплава металла в ручье колеса установки Конформ-Кастекс / **А.С. Потапенко**, А.П. Скуратов, Ю.В. Горохов, И.Ю. Губанов; ФГАОУ ВО «СФУ». – № 207611549; заявл. 28.02.17; зарег. 19.04.17.

18. Патент № 2657396 РФ, МПК В22D 11/06, В21С 23/00. Устройство управления тепловым режимом установки непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов / А.П. Скуратов, Ю.В. Горохов, **А.С. Потапенко**, С.В. Беляев, И.Ю. Губанов, А.Г. Иванов. – № 2017114249; бюл. № 17, опубл. 13.06.2018.