

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический

институт

Теплотехники и гидрогазодинамики

Кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

В.А. Кулагин

подпись

инициалы, фамилия

« _____ » _____ 20 ____ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Исследование тепловой работы установки непрерывного литья и прессования
цветных металлов и сплавов в переходном режиме

Тема

код и наименование направления

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель

подпись, дата

должность, ученая
степень

А.П.Скуратов

инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

Н.П.Попиякова

инициалы, фамилия

Рецензент

подпись, дата

должность, ученая
степень

Ю.В. Горохов

инициалы, фамилия

Красноярск 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Современные способы непрерывного литья и прессования цветных металлов	6
1.1 Основные этапы развития техники прессования цветных металлов.....	6
1.2 Основные методы и процессы непрерывного прессования цветных металлов.....	8
1.3 Прессование цветных металлов способом Конформ.....	19
1.4 Методы исследования процесса непрерывного литья и прессования цветных металлов.....	24
1.5 Выводы по главе.....	31
2. Компьютерное моделирование процесса кристаллизации алюминия и алюминиевых сплавов в установке непрерывного литья и прессования.....	33
2.1 Описание и принципы работы опытно-промышленной установки	33
2.2 Описание используемого программного продукта Ansys.....	34
2.3 Порядок решения тепловой задачи в программном комплексе ANSYS.....	37
2.4 Результаты моделирования теплового процесса кристаллизации в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов.....	50
2.5 Выводы по главе.....	53
3. Экспериментальное исследование установки непрерывного литья и прессования цветных металлов.....	54
3.1 Описание и порядок проведения эксперимента.....	54
3.2 Результаты экспериментального исследования.....	55
3.3 Сравнение результатов экспериментального исследования с компьютерным расчетом.....	58
3.4 Выводы по главе.....	58

	60
Заключение.....	63
Список использованных источников.....	64
Приложение А.....	69

Введение

В настоящее время совмещение процессов литья заготовки, пластической деформации и термообработки в единый непрерывный технологический процесс – одна из важнейших задач в металлургической промышленности.

Данная направленность обусловлена тем, что выше перечисленные методы получения металлических изделий из слитков предполагают значительные затраты энергии на нагрев слитков перед деформацией, значительную металлическую емкость прессового оборудования, наличие четко отлаженных производственных процессов, наличие больших производственных площадей, обслуживание высококвалифицированного персонала и т.д.

Опытно-промышленная установка, совмещающая процессы литья и прессования алюминиевых и медных сплавов была спроектирована и испытана в лабораторных условиях кафедры ОМД Сибирского федерального университета.

Объектом исследования данной работы является установка непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов с горизонтальным кристаллизатором.

Предметом исследования данной работы являются процессы теплообмена в установке непрерывного литья и прессования алюминиевых сплавов в переходном режиме.

Актуальность данной работы заключается в том, что, не смотря на наличие водяной системы охлаждения установки непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов, существуют сложности при регулировании тепловой работы установки в переходном режиме, в связи с чем возникает необходимость стабилизации теплового режима установки работы без нарушения технологического процесса.

Цель данной работы состоит в исследовании тепловой работы установки непрерывного литья и прессования алюминия и алюминиевых сплавов в переходном режиме на основе результатов экспериментального исследования и

расчетно-теоретического исследования.

В процессе выполнения работы были решены следующие задачи:

1. Изучены современные способы непрерывного процесса литья и обработки металлов давлением;
2. Создана компьютерная модель теплообмена в установке непрерывного литья и прессования;
3. Проведено компьютерное моделирование процесса кристаллизации алюминия и алюминиевых сплавов в установке непрерывного литья и прессования в программном комплексе Ansys;
4. Проведено экспериментальное исследование процесса кристаллизации алюминия и алюминиевых сплавов в установке непрерывного литья и прессования;
5. Проанализировано изменение угла кристаллизации от времени для исследуемых сплавов АК-12, АД-31 и чистого алюминия;

Глава 1. Современные способы непрерывного литья и прессования цветных металлов

1.1 Основные этапы развития техники прессования металлов

В настоящее время одной из основных перспектив развития металлургической отрасли промышленности является совмещение процессов термообработки, пластической деформации и литья заготовки. Данная направленность обусловлена тем, что выше перечисленные методы получения металлических изделий из слитков предполагают значительные затраты энергии на нагрев слитков перед деформацией, значительную металлическую емкость прессового оборудования, наличие четко отлаженных производственных процессов, наличие больших производственных площадей, обслуживание высококвалифицированного персонала и т.д [1]. Совмещение процессов литья заготовки, пластической деформации и термообработки в единый непрерывный технологический процесс, лишенный вышеперечисленных особенностей, – одна из важнейших задач в металлургической промышленности.

В XIX в. над решением проблемы создания непрерывного технологического процесса работали многие специалисты металлургической обрабатывающей промышленности, такие как Г. Бессемер, Г. Александер, Д. Грин, Т. Авитцура, Д. Проперци [2]. К достижениям отечественной металлургии с уверенностью можно отнести агрегаты непрерывного литья и прокатки, бесслитковой прокатки ленты, которые были разработаны и применены в промышленности специалистами таких крупных отечественных производств, как «ВНИИМетМаш», «Гипроцветметобработка» и др [3].

Помимо развития и применения прогрессивных методов непрерывного литья и прокатки в настоящее время ведутся работы, направленные на исследование и разработку более эффективных и удобных технологических линий, совмещающих процессы непрерывного литья и обработки металлов давлением. Одним из таких направлений, позволяющих повысить технико-

экономические показатели изготовления мелкосортной продукции в сравнении с традиционным прессованием на горизонтальных гидравлических прессах, является непрерывное литье и прессование цветных металлов [1]. Так, в последние годы получило широкое распространение создание технологических линий непрерывного прессования цветных металлов.

В результате процессов прессования металлов можно получить прессованную продукцию в виде полуфабрикатов и готовых изделий, к которым относятся сплошные, кольцевые и полые профили сложной конфигурации, трубы, панели и т.д. Основополагающим методом деформационной обработки является прессование – процесс выдавливания пресс-изделия из заготовки, помещенной в контейнер [4].

Основные этапы возникновения и развития техники прессования металлов представлены в таблице 1 [5-7].

Таблица 1. Основные этапы развития техники прессования металлов.

№ п/п	Этап	Содержание этапа
1	конец XVIII в. – конец XIX в.	1. изготовление свинцовых прутков и труб прессованием; 2. создание вертикальных трубных прессов с гидравлическим приводом;
2	1895 – 1924 г.г.	1. развитие технологии прямого прессования изделий (прутков, труб, профилей) из медных и алюминиевых сплавов; 2. создание горизонтальных трубопрофильных гидравлических прессов; 3. разработка конструкций прессового инструмента
3	1924 – 1944 г.г.	1. разработка технологии обратного и комбинированного прессования цветных металлов; 2. появление специализированных заводов,

		реализующих технологию прямого прессования цветных металлов;
4	1944 – 1956 г.г.	1. применение прямого прессования для производства стальных пресс-изделий; 2. создание крупногабаритных и скоростных гидропрессов; 3. создание новых жаропрочных сталей и технологических смазок на основе стекла
5	1956 – 1980 г.г.	1. разработка новых и модернизация существующих способов прессования; 2. производство крупногабаритных профилей, панелей и полуфабрикатов
6	1980 г. – наст. Время	разработка и внедрение процессов непрерывного литья и прессования цветных металлов

1.2 Основные методы и процессы непрерывного прессования цветных металлов

В настоящее время находят широкое применение большое разнообразие процессов прессования. Классификация данных процессов прессования производится по наиболее общим типовым признакам, а именно [8]:

- по кинематическим условиям процесса;
- по расположению канала матрицы;
- по граничным условиям процесса;
- по конструкции прессового инструмента;
- по температурным условиям;
- по виду продукции;
- по характеру прессуемого материала;
- по геометрическим условиям истечения;
- по типу оборудования.

В процессе реализации большинства вышеперечисленных методов в конце рабочего цикла от изделия отделяется пресс-остаток, что свидетельствует о дискретном режиме истечения процесса прессования. Так, в последнее время получили широкое распространение методы полунепрерывного и непрерывного прессования прутков и труб [8-10].

Существуют различные способы придания обрабатываемому металлу заданной формы посредством выдавливания его из замкнутого объема через канал, образуемый прессовым инструментом. При этом для всех способов характерно всестороннее неравномерное сжатие, которое представляет собой основной вид напряженного состояния деформируемого металла в пластической зоне. Помимо этого часть обрабатываемого металла в результате неравномерной деформации подвержена напряженному состоянию с растягивающими главными нормальными напряжениями. Однако, не смотря на данные явления, при прессовании создаются оптимальные условия для пластической деформации, в отличие от других видов обработки металлов давлением [11].

В процессе прессования силовое воздействие на заготовку оказывается непосредственно через прессовый инструмент.

В зависимости от вида взаимного перемещения заготовки и контейнера выделяют следующие разновидности прессования:

- прямое прессование, которое получило наибольшее распространение и находит применение в изготовлении всех видов продукции, отличается обязательным, явно выраженным перемещением металла заготовки относительно покоящегося контейнера [12].

- прессование с обратным истечением которое находит применение в изготовлении сплошных и полых профилей, отличается отсутствием явно выраженного перемещения заготовки относительно контейнера, а также обратным направлением движения пресс-изделия относительно пресс-штемпеля [13].

- прессование с совмещенным истечением металла применяется для совмещения прямого и обратного истечений для достижения больших скоростей истечения металла за счет снижения начальной температуры заготовки и отсутствия перехода пресс-изделия в температурную зону хрупкости [14].

- прессование с опережающим заготовку движением контейнера, или прессование с активными силами трения [13-15], при котором контейнер движется в одном направлении с пресс-штемпелем, но с большей скоростью.

Применение существующих традиционных методов прессования позволяет довольно легко получить различные изделия при больших величинах обжатия, однако следует отметить, что при этом на каждом цикле прессования остаются отходы металла, которые впоследствии не находят дальнейшего применения, а закладка очередной заготовки в контейнер прессы сопровождаются временными затратами [1]. В результате таких процессов показатели производительности при прессовании обладают некоторыми ограничениями.

Таким образом, для решения вышеперечисленных проблем в последние годы получило широкое распространение развитие способов непрерывного прессования благодаря разработке и внедрению в промышленность агрегатов непрерывной разливки металлов.

В настоящее время реализуются и исследуются следующие способы непрерывного прессования металлов [16]:

- способ прессования без контейнера, суть которого заключается в периодическом выдавливании металла в матрицу силовым воздействием движущихся к матрице захватов, сжимающих заготовку;

- способы Конформ, Экстролдинг, совмещенная прокатка-прессование (СПП) и Линекс, при которых в качестве рабочего усилия прессования используется сила трения между заготовкой и контейнером;

- способ непрерывного гидростатического выдавливания с принудительной циркуляцией высоковязкой среды, передающей нагрузку.

Активная разработка ряда способов полунепрерывного и непрерывного литья металлов наметилась во второй половине XIX века как результат технической революции и резкого роста использования металлических конструкций [17-18]. Полученные способом полунепрерывного и непрерывного литья металлы в большинстве случаев далее подвергались обработке давлением. Как следствие, возникла необходимость объединения выше перечисленных операций в один технологический процесс непрерывного литья-прессования металлов. Поскольку основной объем получаемых слитков предназначается для прокатки, а, в свою очередь, техническое развитие страны определяется по доле металла, подвергаемого прокатке, в объеме общего выплавляемого металла, проектирование и создание непрерывных линий, совмещающих литье и прокатку, стало одним из основных направлений в развитии технологии металлообработки. Для достижения данной цели применяются в основном кристаллизаторы с подвижными стенками [19-21], на основе которых в настоящее время созданы линии литейно-плавильных агрегатов (ЛПА) по производству проката из цветных металлов и сплавов, отличающиеся высокой производительностью [22-24]. Использование литейно-плавильных агрегатов дает значительный экономический эффект в условиях масштабного массового производства, однако следует отметить, что для изготовления мелких серий на малых предприятиях использование данных линий проблематично из-за высокой стоимости прокатного оборудования и значительными затратами на его содержание и обслуживание. Наиболее ярко эта проблема проявляется при производстве мелкосортной продукции, при котором требуется большое количество комплектов калиброванных валков.

Последние разработки в области процессов непрерывного прессования цветных металлов позволяют решить данную проблему путем замены в литейно-плавильном агрегате прокатного стана на более универсальные установки непрерывного прессования металлов [18]. Установлено, что полученные таким образом пресс-изделия отличаются высоким качеством и относительно низкой себестоимостью их производства, что влечет и

стимулирует повышенный спрос на установки непрерывного прессования металлов методом Конформ. В настоящее время внимание зарубежных и отечественных металлургов направлено на дальнейшую модернизацию и совершенствование данного процесса в большей степени путем улучшения его технико-экономических показателей, а также путем совмещения операций литья и непрерывного прессования в одном агрегате. Последний метод позволит значительно снизить металлоемкость производственных линий, сделать их более гибкими и повысить степень их автоматизации [25-27]. Один из первых таких разработанных устройств с использованием машины Конформ был оснащен элементами роторного кристаллизатора Д. Проперци. Данный способ изготовления пресс-изделий разработан и запатентован в Англии и получил название способ Кастэкс [28]. Установка для прессования методом Кастэкс включает в себя систему непрерывной подачи металла в ручей колеса.

В камере прессового башмака, который закрывает всю нижнюю половину колеса-кристаллизатора, создается достаточно высокое давление для выпрессовывания металла через матрицу [5]. Именно здесь перед началом процесса должен отвердеть и накопиться металл. Далее расплавленный металл подводится через литейный ручей с регулятором наполнения и поступает прямо в канавку колеса, который подвергается интенсивному внутреннему охлаждению, в результате чего происходит непрерывное затвердевание металла в нижней части и по бокам ручья. Твердый металл собирается перед упором, останавливается и отпрессовывается по способу Конформ. Необходимо, чтобы процесс затвердевания металла происходил только в нижних слоях и по бокам ручья и не захватывал зону прессования металла. Хорошие металлургические свойства полуфабрикатов обусловлены во многом высокой скоростью затвердевания.

Описанный способ прессования Кастекс, когда жидкий металл заливается в установку, является одним из наиболее экономичных способов получения стандартной проволоки или профилей по сравнению с другими способами изготовления аналогичных изделий из твердого металла путем деформации.

Осуществление, поддержание стабильного и устойчивого процесса непрерывной кристаллизации жидкого металла и его прессования во многом определяется эффективной работой системы непрерывной подачи расплавленного металла в канавку рабочего колеса [18]. При этом очень важно, чтобы расплавленный металл не подвергался затвердеванию в начальной фазе процесса; скорость перемещения расплавленного металла должна быть постоянной и соответствовать скорости его затвердевания, которая определяется интенсивностью отвода тепла от прессового инструмента, кроме того, необходимо исключить турбулентность в потоке расплавленного металла.

Использование базовой установки Конформ вызывает значительные затруднения в соблюдении вышеуказанных требований для непрерывной заливки жидкого металла, его кристаллизации и прессования. Особенно явно это проявляется в части стабилизации подачи металла в инструмент в результате намораживания жидкой фазы расплава при затвердевании на входную часть неподвижной кольцевой вставки. Устранение указанного недостатка станет возможным при совмещении непрерывного прессования и непрерывного литья на установке Конформ с вертикальной осью вращения колеса-кристаллизатора карусельного типа [26].

На основе анализа зарубежной и отечественной научной, технической и патентной литературе, описывающей современное состояние процессов прессования цветных металлов, установлено, что в иностранных государствах наиболее популярными и эффективными способами производства длинных мелкосортных профилей из цветных металлов и сплавов являются способы Конформ и Кастэкс.

Они послужили основой для создания сотен различных промышленных установок, направленных на выпуск широкой номенклатуры профилей, используя минимум затрат и получая высокое качество выпускаемой продукции.

В Российской Федерации внедрению способов прессования металлов способами Конформ и Кастэкс, к сожалению, не уделяется значительного и

должного внимания, не смотря на явную перспективность использования данных способов, а также на их популярность и широкое распространение в зарубежных странах.

Внедрение данных процессов в отечественную промышленность затруднительно вследствие недостатка научно-технической информации по методикам технического и технологического проектирования, а также его программного обеспечения. Решение указанной проблемы требует развития теоретической базы для научно-обоснованного проектирования и промышленной реализации процессов Конформ и Кастэкс для непрерывного прессования и совмещенного литья-прессования профилей из цветных металлов и сплавов.

Процесс непрерывного литья и прессования цветных металлов отличается достаточно быстрым нагревом элементов установки до высоких температур. Наиболее термонапряженным элементом установки непрерывного литья и прессования является матрица, которая перекрывает канавку вращающегося кристаллизатора.

В процессе прессования в результате трения о стенки кристаллизатора и пластической деформации металла под матрицей выделяется большое количество теплоты [25]. Для стабильной работы установки необходимо поддерживать температуру дугообразного сегмента с матрицей на необходимом по технологии уровне. Решение данной проблемы достигается путем использования принудительного охлаждения матрицы. Кроме того, таким образом можно управлять формированием структуры и свойств материала в процессе затвердевания: изменяя интенсивность охлаждения можно подобрать оптимальный режим отвода тепла, при котором ликвация и пористость не превышали бы допустимые значения, а термические напряжения в элементах установки были бы минимальны [26].

Для установления оптимального режима регулирования температуры необходимо изучить распределение температуры в пресс-форме. На поверхности пресс-формы и внутри нее температура в процессе прессования в

разных точках может быть различной, что приводит к неравномерному затвердеванию и ухудшению качества отливки.

В настоящее время для повышения производительности труда, а также для улучшения качества отливок и повышения стойкости пресс-форм предусмотрены различные системы охлаждения [27]. Данные системы предназначены не только для быстрого отвода тепла от рабочей установки, но и для создания направленного затвердевания, выравнивания и регулирования температурного поля пресс-форм.

Одним из наиболее распространенных способов охлаждения является водяное охлаждение пресс-формы проточной водой (или маслом). Постоянство температуры формы обеспечивается водяным охлаждением по системе каналов, выполняемых в стенках пресс-формы. Повышения стойкости пресс-формы добиваются применением водяного охлаждения, сокращением до минимума времени выдержки заготовки в матрице под давлением и после снятия давления.

Поскольку режим охлаждения пресс-формы существенно влияет на качество изделия, необходимо правильно рассчитывать и проектировать систему термостатирующих каналов формы, которая обеспечит поддержание требуемого теплового режима.

При выборе конструктивного решения системы каналов следует учитывать, что слишком большое увеличение скорости хладагента приводит к значительной неравномерности температурного поля формы. Длина каналов определяется из условия, что эффективная площадь поверхности каналов должна быть не менее охлаждаемой площади оформляющих поверхностей матрицы [28].

Так как при расчете размеров каналов охлаждения принимается ряд допущений, а также вследствие отличия расчетного времени охлаждения отливки от фактического, предусматривается возможность регулирования температуры формы путем регулирования средней температуры жидкости либо изменением расхода охлаждающей жидкости [29].

Внутри пресс-формы система охлаждения может быть последовательной или параллельной.

В параллельной системе охлаждения вода подается в несколько параллельных ответвлений из одного источника, который может быть установлен снаружи или встроен в пресс-форму.

К основным преимуществам параллельной системы можно отнести следующие показатели:

- равномерное распределение охлаждающей жидкости по каналам;
- поддержание одинаковых температуры и скорости течения охлаждающей жидкости в каналах.

Основные недостатки указанной системы:

- равномерность охлаждения может быть потеряна в результате сопротивления течению жидкости из-за изменений диаметров вторичных каналов;

- снижение эффективности охлаждения за счет снижения уровня турбулентности при распределении воды по параллельным каналам пресс-формы.

В последовательных системах охлаждения пресс-форм имеются один вход и один выход охлаждающей жидкости без ответвлений. Это приводит к относительно более длинному пути потока воды.

Преимущества последовательной системы заключаются в следующем:

- более высокая скорость течения воды через пресс-форму, чем в параллельной системе,

- более эффективное охлаждение вследствие большей турбулентности
- меньшее число входов и выходов в системе упрощает установку пресс-формы;

- большая вероятность постоянства скорости потока по всей длине.

К важнейшим недостаткам последовательных систем относятся:

-слишком большое падение давления по длине системы, в результате которого скорость течения понижается, что отрицательно сказывается на эффективности охлаждения;

-избыточное повышение температуры воды в длинной системе, которое приводит к колебаниям в охлаждении и, как следствие, к остаточным напряжениям и короблению отливки.

Для получения качественного изделия существенное значение имеют вентиляционные каналы, место расположения которых следует выбирать в соответствии с правилами расположения их в формах для литья [30]. Размеры вентиляционных каналов подбирают опытным путем в зависимости от размеров детали. После окончательной доводки при испытании формы эти каналы необходимо полировать и хромировать.

Таким образом, при выборе и конструировании системы охлаждения высокотемпературной установки необходимо учитывать следующие моменты:

1. Эффективность охлаждающей жидкости. Скорость течения должна быть достаточной для создания хорошей турбулентности потока. По мере увеличения турбулентности улучшается эффективность охлаждающей жидкости.

2. Температура охлаждающей жидкости. Температура охлаждающей жидкости для конкретных отливок и материалов должна быть сбалансирована с учетом времени охлаждения и качества изделия. Более теплая пресс-форма обычно приводит к получению отливки с меньшими остаточными напряжениями и лучшим качеством поверхности; но с экономической точки зрения предпочтительнее более низкие температуры для сокращения времени цикла.

3. Падение давления. Слишком длинные или малые в поперечном сечении участки в системе охлаждения приведут к повышенным давлениям. При избыточном давлении они вызовут снижение скорости течения.

Дополнительными факторами, увеличивающими падение давления, являются изгибы каналов под острым углом и фитинги, используемые для их соединения.

4. Расположение каналов охлаждения. Расположение системы охлаждения должно обеспечивать равномерное охлаждение всех частей отливки.

5. Охлаждающая жидкость. Охлаждающими жидкостями могут быть вода, водные растворы гликолей различной концентрации и масло. Вода является лучшей средой для отвода тепла, но ее применение ограничено температурами замерзания и кипения.

6. Загрязнение каналов системы охлаждения. Данное явление может возникать в результате осаждения минеральных солей на внутренних стенках каналов.

Такой осадок ограничивает течение воды и действует в качестве изолятора. Регулярная промывка каналов охлаждения раствором соляной кислоты способствует исключению минерального осадка. Также для снижения проблем загрязнения каналов в пресс-формах используются нержавеющие стали [31-33].

Наиболее эффективным, по совокупности рассмотренных выше признаков является устройство для охлаждения установки непрерывного литья-прессования металлов, содержащее колесо-кристаллизатор с кольцевой канавкой, которая вверху сопряжена с неподвижным дугообразным сегментом, заканчивающимся выступом, перекрывающим поперечное сечение канавки и установленная перед выступом пресс-матрица, коллектор для охлаждения дна кристаллизатора, устройство дополнительно снабжено коллекторами, один из которых охватывает внутреннюю и наружную поверхности колеса-кристаллизатора, а другой установлен на верхней поверхности дугообразного сегмента представлен на рисунке 1.

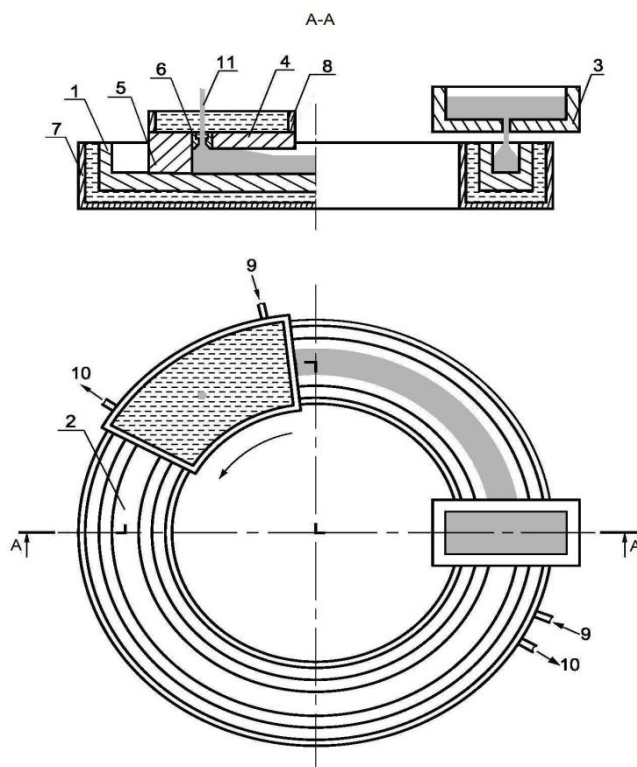


Рисунок 1 – Устройство для охлаждения инструмента установки непрерывного литья-прессования цветных металлов и сплавов

1 – колесо-кристаллизатор; 2 – ручей; 3 – дозатор; 4 – башмак; 5 – упор;
6 – матрица; 7, 8 – коллектор; 9, 10 – патрубки

1.3 Прессование цветных металлов способом Конформ

Способ Конформ занимает особое место среди перечисленных методов непрерывного прессования металлов, поскольку отличается более эффективными технико-экономическими показателями, а также широкой сферой применения. Кроме того, данный способ является особенно перспективным и актуальным для использования в цветной металлургической промышленности [30-31].

Способ Конформ был предложен Д. Грином в 1970 г., запатентован в 1971 г. (патент №1370894 GB). Впервые данный способ был опробован на модели для пластилина, далее последовало изготовление настольной модели с

ручным приводом, где прессованию подвергался свинец. Впоследствии были созданы несколько модификаций установки МК2:

- модель МК2А (1972 г.), где в качестве заготовки использовался пруток из алюминия диаметром 6,36 мм.;

- модели МК2В, МК2С, где в качестве заготовки использовались прутки из алюминия и меди диаметром 9,5 мм.

В основе способа Конформ (рисунок 2) лежит применение подвижного вращающегося колеса с врезанной канавкой и примыкающего к нему неподвижного инструмента, называемого башмаком. В торце башмака находится матрица, перекрывающая врезанную в колесо канавку. В качестве заготовки используется пруток 7, который задается в ручей 2, который выполнен в виде кольцевой канавки в рабочем колесе 1 и с внешней стороны закрыт прижимным башмаком 3. На внутренней поверхности башмака находится выступ 4, который охватывает заготовку 7. Блок инструмента с прессовой матрицей 5 также закреплен в башмаке [34].

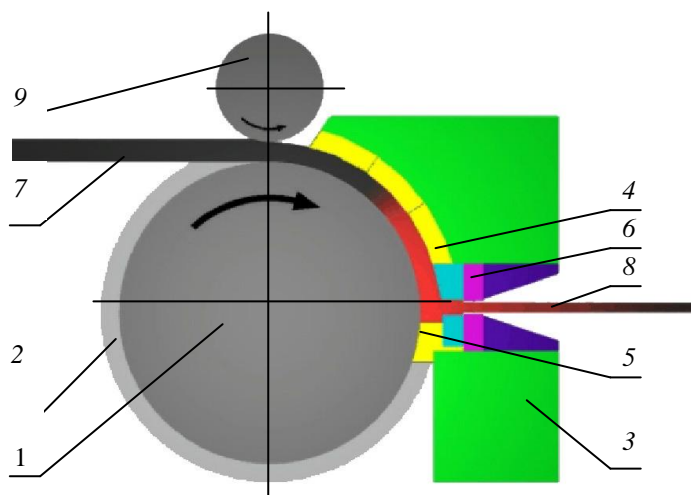


Рисунок 2 – Принципиальная схема реализации процесса непрерывного прессования по способу Конформ [30]:

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

Прутковая заготовка обладает диаметром меньшим, чем ширина канавки между башмаком и колесом; заготовка подается в данный зазор и постепенно продвигается под воздействием сил трения в камеру прессования и в конечном итоге достигает матрицы.

В зоне, расположенной перед матрицей, заготовка подвергается интенсивному пластическому деформированию и заполняет все сечение канавки, что способствует увеличению сил трения между поверхностью канавки и заготовкой. При повороте колеса возрастает сжимающее усилие, приложенное к заготовке, затем усилие достигает такой величины, которая необходима для выдавливания заготовки через отверстие в матрице, т. е. начинается процесс прессования. Зона неполного контакта заготовки с поверхностью канавки, или зона первичного захвата, необходима для развития давления для пластического деформирования материала и заполнения пространства в зоне, расположенной перед матрицей. Заготовкой при использовании данного способа прессования может служить обычная проволока. При этом процесс ее деформирования, включающий в себя такие процессы, как втягивание в камеру прессования по мере поворота колеса, предварительное профилирование, заполнение зазора в колесе, создание рабочего усилия и, наконец, прессование, протекает непрерывно (другими словами, реализуется технология непрерывного выдавливания) [32].

Следует отметить, что если вместо сплошной заготовки в камеру прессования непрерывно подавать порошковый или гранулированный материал, то заполнение камеры и нарастание давления будет происходить совершенно аналогичным образом. Выделяющееся при трении материала о поверхность башмака высокое давление и теплота способствуют свариванию частиц материала, при этом, как следствие, достигается непрерывное прессование сплошного изделия[33].

В процессе прессования меди способом Конформ необходимо, чтобы длина захватывающей части инструмента была существенно больше, чем при прессовании алюминия, поскольку медь не имеет свойства налипания на

поверхность инструмента. Механические и электрические свойства медной проволоки, полученные способом Конформ выше, а проволоки из алюминия несколько ниже (исключение – электропроводность), чем у проволоки, полученной волочением с последующим отжигом [34]. Выбирая соответствующую форму отверстия матрицы, можно получить проволоку круглого или прямоугольного сечения, а используя язычковые матрицы, можно прессовать полые изделия.

В зоне, расположенной непосредственно перед матрицей, материал заготовки подвергается действию высокого давления, при котором происходит пластическое течение. При этом возможно выдавливание не только в направлении вращения колеса по касательной к его окружности, но и в перпендикулярном ему направлении, причем во многих случаях последний вариант оказывается предпочтительным (рисунок 3).

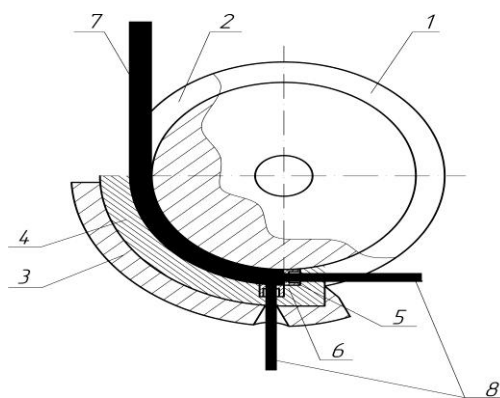


Рисунок 3 – Схема непрерывного прессования способом Конформ:

- 1- приводное колесо; 2-кольцевая канавка; 3- башмак; 4- кольцевая вставка;
5,6-матрицы; 7- прутковая заготовка; 8 - пресс-изделие

Главным фактором, определяющим возможность внедрения способа Конформ в промышленность, является не только непрерывность процесса, но и его экономическая эффективность при производстве, связанная с меньшими капитальными затратами [35].

Для некоторых материалов, которые в силу их физических свойств или формы с трудом покрывают ручей колеса, применяют предварительное

компактирование подаваемого материала в зоне ручья колеса с помощью приводного валка 3, который вмонтирован между бункером и входом в инструмент (рисунок 4). При обработке металлов на основе алюминия использование приводного данного валка не всегда обязательно, так как налипающее покрытие из алюминия легко образуется в ручье колеса. В то же время при его применении предварительное компактирование исходного дробленого металла увеличивает производительность и уменьшает возможность захвата воздуха, который в свою очередь может привести к образованию пузырей или раковин на поверхности изделия. Для частиц с высоким отношением L/d (рубленной проволоки), которые не могут легко входить в ручей колеса за счет силы тяжести, эффективно может быть использован тангенциальный ручей с вибратором или поршневым плунжером [35].

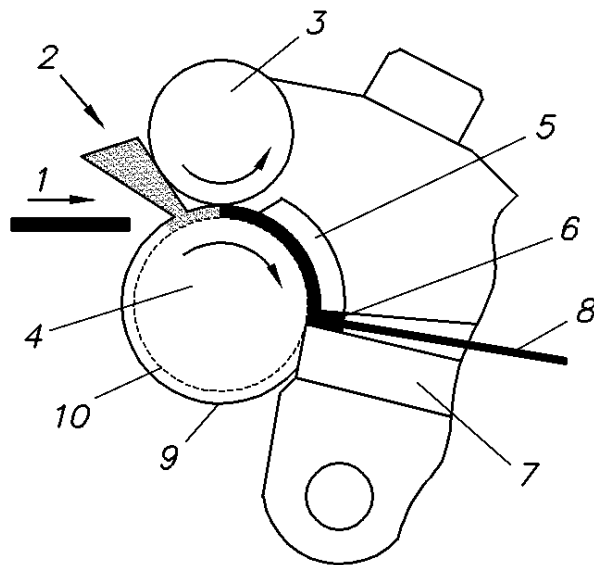


Рисунок 4 – Схема установки Конформ для порошковых материалов:

- 1 – подача прутковой заготовки; 2 – подача частиц из бункера; 3 – приводной валок; 4 – колесо; 5 – кольцевая вставка; 6 – матрица; 7 – упор; 8 – полуфабрикат; 9 – периферийная поверхность колеса; 10 – основание ручья

Ранние конструкции матрицы для установки Конформ имели ограничения по диаметру или профилю, поскольку предполагалось, что размер матрицы не должен превышать площадь поперечного сечения ручья колеса. Последующие эксперименты доказали, что возможно применение прессования с расширяющейся у матрицы камерой, которая принимает окончательный размер вне этого ограничения и позволяет увеличить габариты изготавливаемой продукции [36]. Таким образом осуществлялось прессование изделий, имеющих размеры, большие размеров исходного прутка.

1.4 Методы исследования и расчета процесса непрерывного литья и прессования цветных металлов

При непрерывном прессовании способом Конформ давление возникает в результате контактного трения между поверхностью кольцевой канавки приводного колеса и заготовкой. Такие параметры процесса непрерывного прессования, как крутящий момент на валу колеса, давление прессования и мощность электрического привода установки, определяются величиной контактной площади заготовки с инструментом. Для расчета последней величины существуют графический, графоаналитический и аналитический методы, а также ряд эмпирических зависимостей [37]. Контактная площадь определяется поверхностью, ограниченной проекцией линии пересечения заготовки с поверхностью инструмента. Вследствие данного факта перед расчетом площади контакта между заготовкой и инструментом необходимо определить поперечные размеры контейнера, обеспечивающие продвижение заготовки за счет сил контактного трения. После определения необходимых размеров можно рассчитать длину контакта между контейнером и заготовкой, которая обеспечивает площадь трения для создания усилия необходимой величины для прессования металла.

На данный момент непрерывное прессование способом Конформ является наиболее распространенным и популярным, поскольку отличается

малой энергоемкостью и высокой производительностью. Используя данный метод, можно получить пресс-изделия достаточно больших размеров и с большими степенями деформации. Существенным недостатком при непрерывном прессовании методом Конформ является, то что между заготовкой и неподвижной частью контейнера возникает повышенное трение. Кроме того, сложность составляет управление температурными режимами в очаге деформации.

В установках Конформ используется кольцевой контейнер с поперечным сечением прямоугольной и квадратной формы. При попадании в ручей круглой прутковой заготовки она подвергается незначительному обжатию и продвигается до упора, который перекрывает поперечное сечение контейнера на выходе участка сопряжения калибра с неподвижной сегментной вставкой. По мере прекращения продольного перемещения заготовки начинается процесс ее распрессовки до полного заполнения поперечного сечения контейнера. Площадь контакта металла с калибром возрастает ровно до того момента, пока величина сил контактного трения не достигнет величины, необходимой для выдавливания металла через канал матрицы.

Таким образом, можно утверждать, что контейнер по длине делится на две зоны [37-38]. Первая представляет собой зону неполного контакта металла с боковой поверхностью контейнера при небольшом обжатии заготовки после ее подачи в ручей колеса; вторая – зона полного контакта металла по сечению контейнера в результате распрессовки заготовки.

Поперечное сечение контейнера обычно выполняют прямоугольной и квадратной формы. Металл подается к матрице по трем сторонам ручья колеса в результате контактного трения в зоне полного контакта. При этом металл движется неравномерно по контейнеру в результате преодоления силы трения по неподвижной четвертой стороне ручья. В следствие неравномерности движения металла образуется зона прилипания в приконтактном к сегменту слое. Для того, чтобы исключить это нежелательное явление, необходимо определить соотношение между шириной и высотой поперечного сечения

контейнера, когда пластическая деформация металла охватывает всю зону полного контакта.

Значительное воздействие на силовые условия процесса непрерывного прессования металла оказывает величина входного угла пресс-матрицы. Данный факт обусловлен тем, что размеры поперечного сечения контейнера при способе непрерывного прессования Конформ намного меньше, чем установках при традиционном прессовании. Так, силы контактного трения во входной зоне пресс-матрицы оказывают огромное влияние на силовые параметры процесса непрерывного прессования металла. Неравномерность движения металла по сечению контейнера приводит к увеличению остаточных напряжений на выходе пресс-изделия из пресс-матрицы. Качество пресс-изделия определяется данным уровнем остаточных напряжений. Так, например, при достижении данного уровня величины, которая близка к величине временного сопротивления разрыву сплава, происходит образование трещин и разрушение прессовки. Неравномерность движения металла можно уменьшить путем подачи смазки на неподвижную поверхность контакта заготовки и контейнера. Однако данным способ снижения неравномерности не используется на практике из-за трудности его осуществления. Также следует отметить, что еще одним фактором, оказывающим значительное влияние на степень неравномерности течения металла при входе в канал пресс-матрицы, является угол наклона ее последней оси к направлению движения заготовки.

На основании выше перечисленных факторов, влияющих на неравномерность течения металла, можно установить следующий порядок для определения размеров и формы деформирующего инструмента для непрерывного прессования металлов способом Конформ:

-определение такого соотношения высоты и ширины прямоугольного сечения контейнера, при котором поверхность покоящейся части контейнера является границей пластической области, по высоте, движущейся вдоль контейнера заготовки;

-определение входного угла пресс-матрицы, который обеспечивает наименьшую удельную силу прессования;

-определение длины зоны полного контакта, необходимой для действия силы контактного трения на процесс прессования;

-определение длины зоны неполного контакта;

-определение угла между продольными осями контейнера и канала матрицы, который обеспечивает равномерное движение металла по сечению деформационной зоны.

Оптимальные размеры и геометрия инструмента в первую очередь учитываются при определении энергосиловых параметров процесса непрерывного прессования способом Конформ. Они необходимы для расчета прочности элементов установки непрерывного, а также для выбора элементов системы привода.

Силовые условия проведения процесса непрерывного прессования, прежде всего, определяют такие факторы, как сопротивление пластической деформации прессуемого металла σ_s , величина которого зависит от его прочностных свойств, температуры, скорости и степени деформации, размеров поперечного сечения контейнера и величины коэффициента вытяжки [25].

Прессование в горячем состоянии – неотъемлемое условие прессования металлов и различных сплавов. Температура и скорость течения металла при прессовании выступают основными технологическими факторами процесса непрерывного прессования металлов и их сплавов. От температуры нагрева инструмента прессования и заготовки для прессования, а также от скорости прессования (другими словами, температурно-скоростной режим) зависит ряд важных технологических параметров:

- температура прессуемого металла в процессе выдавливания;
- энергосиловые параметры процесса непрерывного прессования;
- характер течения металла в ручье колеса;
- равномерность свойств и структуры пресс-изделия;
- стойкость прессового инструмента;

- технико-экономические показатели процесса прессования в целом.

Температурно-скоростной режим прессования играет определяющую роль при создании оптимальных условий процесса прессования, а именно: достижения максимальной скорости при прессовании и получения необходимого и достаточного качества получаемых пресс-изделий. Следует отметить, что высокая температура прессования может не только послужить причиной снижения качества пресс-изделий, но и привести к появлению бракованных изделий. В свою очередь низкая температура прессования приводит к возрастанию сопротивления деформации, поэтому процесс прессования не может быть осуществлен в следствие превышения усилия прессования на усилием используемого оборудования для прессования. Так, для оптимального температурно-скоростного режима прессования необходимо избежать обоих указанных граничных случаев.

Прессование профилей обычно проводится без смазывающей жидкости и представляет собой один из самых энергоемких процессов ОМД, при котором большая часть затраченной на осуществление процесса энергии идет на образование тепла. По мере увеличения скорости прессования, температура прессования также значительно возрастает. Для каждого алюминиевого сплава определена своя, свойственная только данному сплаву, «критическая» температура, при которой пресс-изделие подвергается разрушению. Температура прессования не должна достигать значений, выше критической температуры сплава. Так, тепловые условия прессования алюминиевых сплавов оказывают решающее влияние на эффективность производства пресс-изделий. Как следствие, актуальной становится задача анализа теплового взаимодействия системы металл-инструмент, а также задача определения зависимости изменения тепловых условий в процессе прессования. Поскольку тепловое взаимодействие при прессовании представляет собой достаточно сложный процесс, его анализ следует свести к ориентировочной оценке, используя уравнение теплового баланса системы деформируемый металл - инструмент прессования – окружающая среда в очаге деформации [38]..

Уравнение теплового баланса очага пластической деформации имеет вид в единицу времени:

$$Q_3 + Q_d + Q_{TP} - Q_{PP} - Q_{OxI} = 0, \quad (1.1)$$

где Q_3 - тепло, поступающее в пластическую зону с заготовкой, имеющей начальную температуру T_0 ;

Q_d - тепловыделение от работы пластической деформации;

Q_{TP} - тепло от преодоления трения с неподвижным инструментом;

Q_{PP} - тепло, уносимое из пластической зоны пресс-изделием (профилем);

Q_{OxI} - тепло, уходящее в окружающую среду через инструмент.

Использование данной методики уместно для стационарного температурного режима, установившегося в процессе непрерывного прессования, либо естественным путем в результате теплообмена путем конвекции между инструментом и окружающей средой, либо при помощи принудительной системы охлаждения инструмента, заготовки и пресс-изделия.

Учитывая указанные факторы, при составлении уравнения теплового баланса необходимо учитывать определенные допущения:

-изотропность и однородность контактирующих тел в процессе деформации;

-отсутствие постороннего тепла на границе контакта металла и инструмента;

-соблюдение изотермических условий и постоянной скорости течения металла в процессе непрерывного прессования металлов;

-преобразование работы сил трения и деформации в теплоту;

-поперечное сечение контейнера принято квадратным ($h = b$);

-равенство коэффициентов трения по всем его поверхностям контакта с деформируемым металлом.

Принимая в учет указанные положения, формула для вычисления Q_3 принимает следующий вид:

$$Q_3 = T_0 b^2 \rho \cdot c \cdot v_0, \quad (1.2)$$

где ρ и c – соответственно плотность и теплоемкость материала заготовки;

v_0 - скорость подачи заготовки в контейнер;

T_0 - начальная температура заготовки.

Рассчитывая Q_d , можно воспользоваться формулой для прессования с боковым истечением деформируемого металла:

$$Q_d = \sigma_s(T, \varepsilon, \xi)(1,45\lambda + 0,8)b^2\lambda \cdot v_0, \quad (1.3)$$

$$Q_d = b^2 v_0 \sigma_s(T, \varepsilon, \xi) \ln \lambda \left\{ \frac{2f}{\sin \beta} + \frac{1}{27tg^2 \frac{\beta}{2}} \left[\left(12 + 9tg^2 \frac{\beta}{2} \right)^{\frac{3}{2}} - 12^{\frac{3}{2}} \right] \right\}. \quad (1.4)$$

где $\sigma_s(T, \varepsilon, \xi)$ - сопротивление деформации материала заготовки, значение которого можно представить в виде эмпирической зависимости.

Значение Q_{TP} определится следующим выражением:

$$Q_{TP} = 4b \cdot \sigma_s(T, \varepsilon, \xi) \cdot f \cdot R \cdot \varphi_1 \cdot v_0, \quad (1.5)$$

где $\varphi_1 = \frac{b \ln \lambda}{\sqrt{3} \cdot R} \left(\frac{1}{\sin 2\beta} + \frac{1}{27tg^2 \beta} \left((12 + 9tg^2 \beta^2)^{\frac{3}{2}} - 12^{\frac{3}{2}} \right) \right)$;

Q_{TP} - тепло, уносимое из пластической зоны пресс-изделием;

Q_{OxI} - тепло, уходящее в окружающую среду через инструмент.

Тепло, уносимое из пластической зоны пресс-изделием:

$$Q_{TP} = F_{np} T_{np} \rho c v_{np}, \quad (1.6)$$

где T_{np} - температура профиля на выходе из канала матрицы;

F_{np} - площадь поперечного сечения профиля.

Доля тепла, уходящего из деформационной зоны через инструмент в окружающую среду, определяется выражением:

$$Q_{OxI} = (T_K - T_C) \cdot \left[R \left(\varphi_1 + \varphi_2 \frac{b}{\alpha_K} \right) \cdot 4 \cdot b + F_v \right] / (S_K / \Lambda + 1 / \alpha_K), \quad (1.7)$$

где Λ и α_K - теплопроводность материала инструмента и коэффициент теплоотдачи соответственно;

S_K – толщина стенок контейнера;

T_K и T_C - температура контейнера и окружающей среды.

Следует отметить, что при использовании принудительного охлаждения инструмента данная формула примет совершенно другой вид и в значительной мере будет зависеть от устройства и метода охлаждения.

Использование полученных значений позволит в первом приближении оценить выходную температуру профиля:

$$T_{пр} = T_0 + \frac{\sigma_s}{\rho c} \left[(1,45\lambda + 0,8)\lambda + \frac{2R\varphi_1}{b} \right] - \frac{(T_K - T_C)(4R\varphi_1 + b)}{\rho c v_0 b (S_K/\Lambda + 1/\alpha_K)}. \quad (1.8)$$

Использование данной методики расчета для выбора температурно-скоростных режимов непрерывного прессования металлов с учетом сопротивления деформации от температуры, степени и скорости позволяет в первом приближении установить рациональный режим и выбрать пути по его совершенствованию.

1.5 Выводы по главе:

В результате анализа литературных источников и состояния современных процессов обработки цветных металлов давлением определено, что наиболее распространенным и эффективным из рассмотренных методов является прессование цветных металлов способом Конформ. Установлено, что при всех преимуществах данного метода существует ряд проблем, возникающих при его применении. В большей степени эти проблемы обусловлены ненадежной работой установки и необходимостью регулирования тепловой работы установки в переходном режиме. Для вывода установки на стационарную работу необходимо стабилизировать тепловой режим установки работы без нарушения технологического процесса.

Цель исследования заключается в изучении тепловой работы установки непрерывного литья и прессования алюминия и алюминиевых сплавов в переходном режиме на основе результатов эксперимента.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. провести компьютерное моделирование процесса кристаллизации алюминия и алюминиевых сплавов в установке непрерывного литья и прессования в программном комплексе Ansys;

2. провести экспериментальное исследование процесса кристаллизации алюминия и алюминиевых сплавов в установке непрерывного литья и прессования;

3. проанализировать изменение угла кристаллизации от времени для исследуемых сплавов АК-12, АД-31 и чистого алюминия;

4. разработать устройство по управлению тепловым режимом установки непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов.

2. Компьютерное моделирование процесса кристаллизации алюминия и алюминиевых сплавов в установке непрерывного литья и прессования

2.1 Описание и принципы работы опытно-промышленной установки

Схема совмещения непрерывного литья-прессования металла с помощью установки Конформ, выполненной на базе карусельного кристаллизатора приведена на рисунке 5.

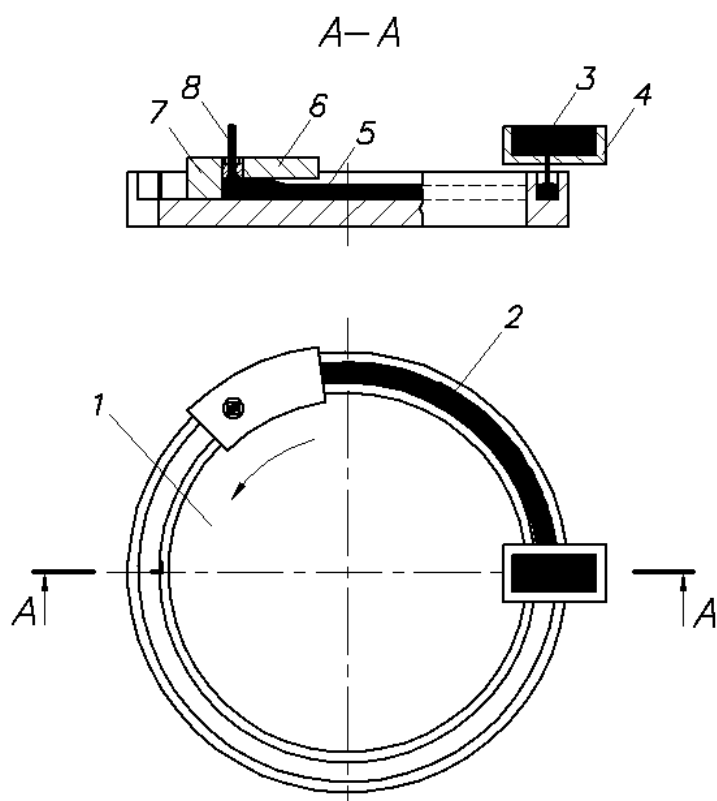


Рисунок 5 – Схема установки непрерывного литья-прессования с вертикальной осью вращения колеса:

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 кристаллизуется до входа в камеру прессования. Камера прессования в свою очередь образована на участке сопряжения ручья с

матрицедержателем 6. Слиток 5 поступает в камеру прессования и выдавливается в отверстие матрицы 7 в виде пресс-изделия. При этом процесс заливки жидкого металла в канавку, его кристаллизация и прессование идет непрерывно и соблюдение всех вышеуказанных требований не представляет трудностей.

Опытно-промышленная установка, совмещающая процессы литья и прессования алюминиевых и медных сплавов, действующая по представленной выше схеме, была спроектирована и испытана в лабораторных условиях кафедры ОМД Сибирского федерального университета.

2.2 Описание используемого программного продукта Ansys

ANSYS CFX – инструмент для оптимизации процесса разработки и технологической подготовки в области вычислительной динамики жидкостей и газов. ANSYS CFX совмещает в себе передовую технологию решателя с современным пользовательским интерфейсом и адаптивной архитектурой, что делает этот инструмент доступным как для разработчиков, владеющих общими инженерными знаниями, так и для специалистов в области гидродинамики, работающими с моделью и ее свойствами на глубоком уровне. CFX позволяет детально изучить оборудование и процессы изнутри, повысить эффективность, увеличить срок службы и оптимизировать процессы.

Модуль ANSYS CFX полностью интегрирован в расчетную среду ANSYS Workbench - платформу, объединяющую все инструменты инженерного моделирования компании ANSYS. Адаптивная архитектура позволяет пользователю выполнять любые действия от стандартного анализа течения жидкости или газа до обработки сложных взаимодействующих систем. Пользователи могут легко оценить производительность во множественных расчетных точках или сравнить несколько альтернативных конструкций. Для решения задач из различных расчетных дисциплин в рамках платформы ANSYS Workbench можно получить доступ к общим для всех расчетов

инструментам, таким как инструменты для работы с геометрией ANSYS DesignModeler и с сеткой ANSYS Meshing.

Геометрия создаётся в модуле ANSYS DesignModeler, специально разработанном для создания геометрии, ее подготовки к моделированию. Эта полностью параметрическая среда является простой в использовании, обладает прямыми и двусторонними связями со всеми основными CAD-пакетами и используется как средство согласования и ввода геометрии во все программные продукты ANSYS для последующих инженерных расчетов.

Для получения точных результатов расчетов в области вычислительной динамики жидкостей и газов необходима самая совершенная технология создания сетки. ANSYS Meshing предоставляет множество технологий построения сетки в одном приложении. Это дает возможность выбрать наиболее подходящий способ построения сетки на основе применения подхода последовательного построения сетки на каждой из деталей сборки.

Физический препроцессор ANSYS CFX - это современный, интуитивно понятный интерфейс для подготовки к моделированию динамики жидкостей или газов. В дополнение к основному режиму работы встроенный мастер помогает пользователю пройти процесс подготовки общих расчетов течения жидкостей или газов.

Мощный язык программирования дает возможность задать описание проблемы в числовом виде, как в случае со сложными граничными условиями, авторскими моделями материалов или дополнительными уравнениями переноса. Адаптивная архитектура CFX-Pre также позволяет пользователю создавать собственные панели графического пользовательского интерфейса, чтобы стандартизировать ввод для выбранных приложений.

Сердцем модуля решателя Ansys CFX Solver является передовой алгебраический многосеточный сопряженный решатель, использующий технологию Coupled Algebraic Multigrid, являющуюся ключом к получению точных результатов в короткие сроки. Параметры решателя, граничные условия могут быть скорректированы во время выполнения расчета, при этом нет

необходимости останавливать решатель. Решатель ANSYS CFX использует схему дискретизации второго порядка по умолчанию, обеспечивая получение максимально точных результатов.

Использование технологии сопряженных решателей ANSYS CFX дает значительные преимущества при проведении любого расчета и позволяет получить устойчивые и масштабируемые решения для задач динамики жидкостей и газов.

Описание результатов графического и количественного анализа, полученных в ANSYS CFX, выполняется в ANSYS CFD-Post. Возможность написания сценариев, полная автоматизация, генерация отчетов, дают пользователю максимальное количество информации, полученной в результате расчетов.

Ansys CFX и Ansys FLUENT – это основные продукты для задач гидрогазодинамики общего назначения, предлагаемые компанией ANSYS, Inc. Оба решателя разрабатывались в течение десятилетий независимо друг от друга и обладают несколькими существенными отличиями, несмотря на некоторые схожие черты. 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.

Решатель ANSYS CFX использует сетку конечных элементов (числовые значения в узлах сетки), схожую с теми, что используется в анализе прочности, для дискретизации области. В отличие от ANSYS CFX, решатель ANSYS FLUENT использует сетку конечных объемов (числовые значения в центрах ячеек). В итоге оба подхода формируют уравнения для конечных объемов, которые обеспечивают сохранение значений потока, что является необходимым условием для точных решений задач гидрогазодинамики. В ANSYS CFX особый упор сделан на решение основных уравнений движения (сопряженная алгебраическая сетка), а ANSYS FLUENT предлагает несколько подходов к

решению (метод на основе плотности, расщепленный метод на основе давления, сопряженный метод на основе давления). Оба решателя содержат в себе самые ценные возможности физического моделирования для получения максимально точных результатов.

2.3 Порядок решения тепловой задачи в программном комплексе ANSYS CFX

В процессе решения поставленной тепловой задачи компьютерного моделирования теплового процесса кристаллизации в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов в программном комплексе Ansys CFX был определен следующий порядок работы.

Запуск программной платформы ANSYS Workbench. В левой панели инструментов «Системы анализа» (Analysis Systems) выбор анализ Fluid Flow (CFX). Далее в рабочей области «Project Schematic» появится модуль в виде структурной схемы, в которой каждому этапу соответствует раздел, содержащий объекты расчетной модели (рисунок 6):

- постобработка в ANSYS CFD-Post
- решатель ANSYS CFX-Solver Manager
- предобработка в CFX-Pre
- создание сеточной модели в ANSYS Meshing
- создание геометрии в ANSYS DesignModeler
- название системы

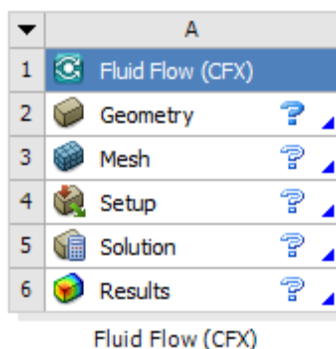


Рисунок 6 – Структурная схема

Для создания новой геометрической модели нужно нажать правой кнопкой мыши «Geometry» в структурной схеме модуля Fluid Flow (CFX) (Рисунок 6). Появится контекстное меню, которое позволяет создать новую геометрию «New Geometry», импортировать данные геометрии, передать существующую геометрию в другие системы анализа для работы в исходном проекте, стереть данные, просмотреть свойства геометрической модели. Выбрав «New Geometry» в контекстном меню откроется программа для работы с геометрией ANSYS DesignModeler.

После открытия DesignModeler появится диалоговое окно с выбором единицы измерения длины. В данной задаче единицей измерения выступает метр.

Графический интерфейс программы состоит из окон с графиком модели 3D «Graphics», со схемой модели «Tree Outline», с детальным обзором функций «Details View», и с разнообразными панелями инструментов (рисунок 7). Аналогична организация графического интерфейса других программ, которые будут использоваться в дальнейшем.

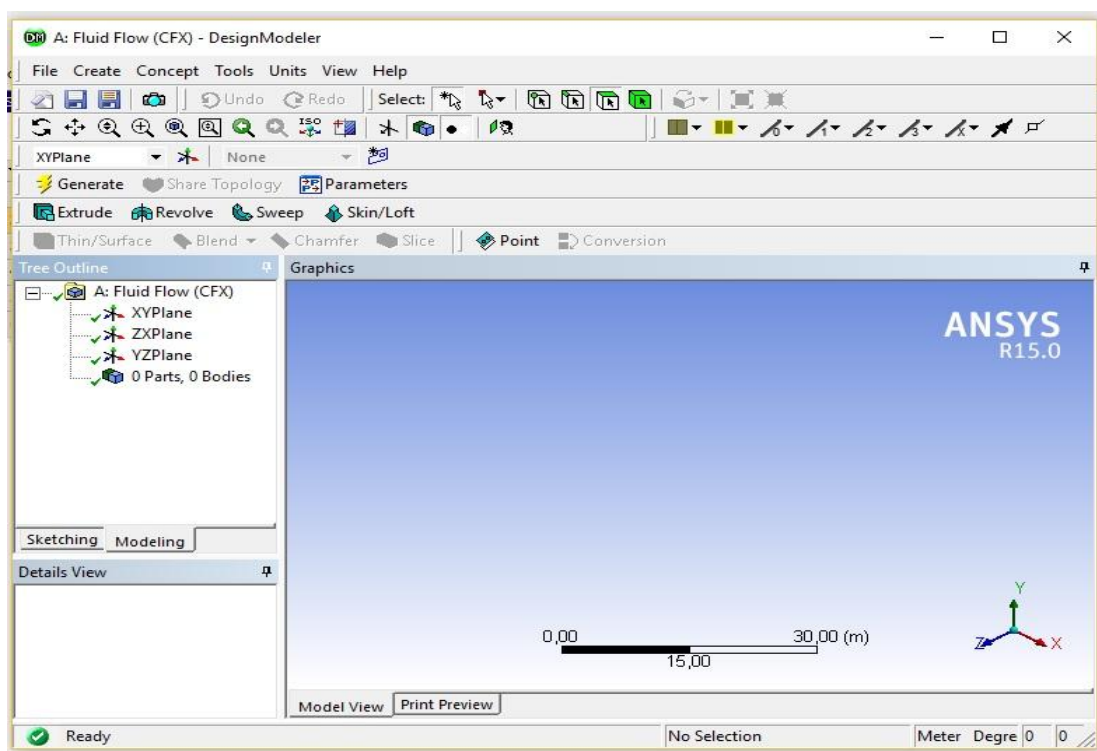


Рисунок 7 – Схематический вид начального проекта

Так как необходимая геометрическая модель была построена ранее в программном продукте SolidWorks, необходимо импортировать геометрию в Ansys. Для этого в главной панели нажимаем *File -> Import external geometry file*. Геометрия подгружается в препроцессор, после чего, для её отображения необходимо нажать кнопку *Generate* (рисунок 8).

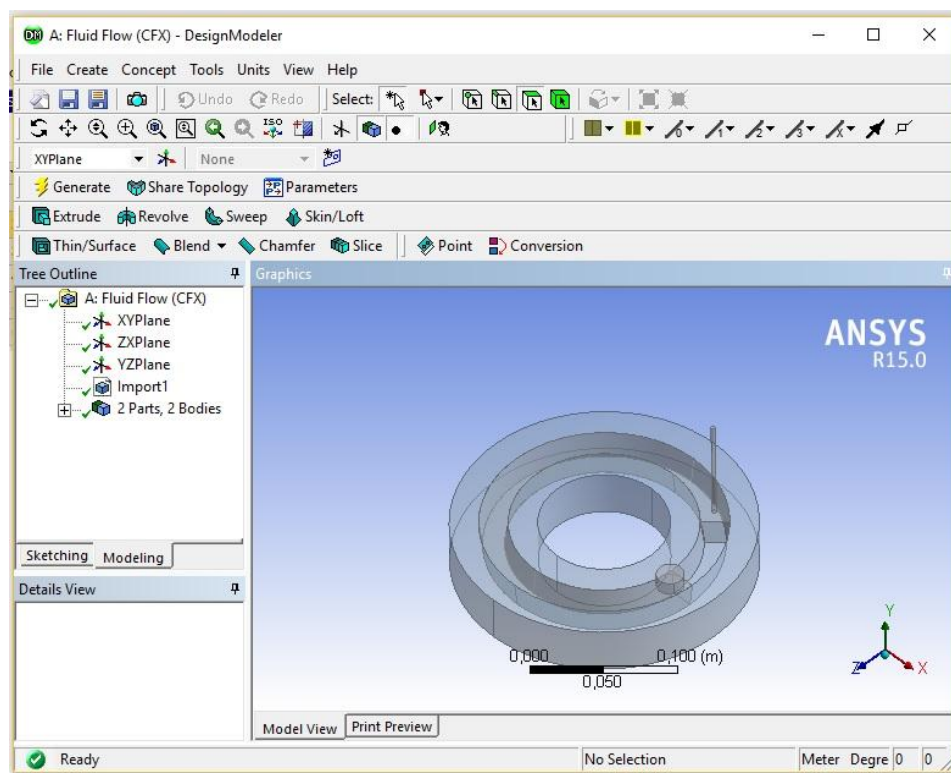


Рисунок 8 – Импортированная геометрическая модель

Для создания сеточной модели следует выбрать «Mesh» в структурной схеме модуля Fluid Flow (CFX) (рисунок 6). В открывшейся программе Meshing в «Outline» выбрать «Mesh» – в нижней части программы «Details of Mesh» появятся опции для работы с сеткой.

Инструменты для создания сетки позволяют генерировать сеточные модели для разных типов анализа. Во вкладке «Defaults» необходимо выбирать метод вычислительной гидродинамики «CFD», решатель «CFX».

Качество сеточной модели (рисунок 9) влияет на точность, сходимость и скорость получения решения. Пространственное разрешение в данном случае принимается равным 1 мм. Тестирование показало, что дальнейшее сгущение

расчетной сетки не влияет на результаты. ANSYS Meshing, позволяет задавать особые настройки сетки в требуемой зоне модели используя команду *Mesh Control* -> *Sizing* . Для решения данной задачи наибольший интерес представляют поверхности симметричные относительно вертикальной оси. Во вкладке «Sizing» выбираем минимальное и максимальное разрешение сетки «Min Size», «Max Size». Для применения настроек сетки нужно нажать кнопку «Update» . Во вкладке «Statistics» можно посмотреть полученные числа узлов и элементов.

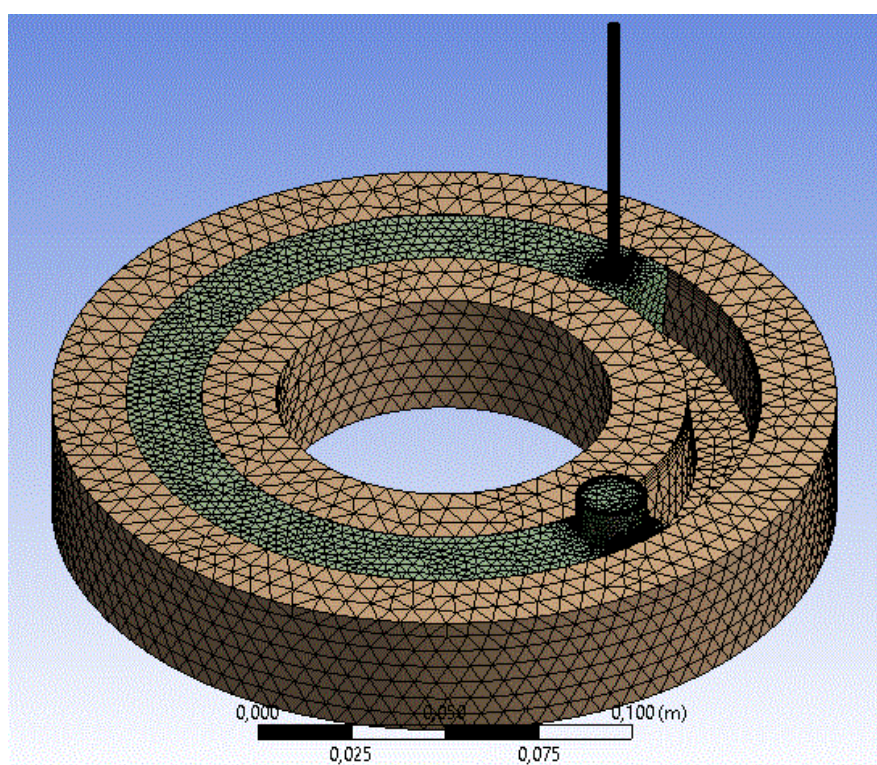


Рисунок 9 – Сеточная модель

Следующим этапом является модуль CFX-Pre. ANSYS CFX-Pre реализует процесс определения физики задачи. Физический препроцессор импортирует сетку, созданную на предыдущем шаге. Это следующий шаг постановки задачи, на котором определяются физические модели, на основе которых будет происходить симуляция процесса, а также их основные параметры и характеристики. CFX-Pre позволяет определить начальные и граничные условия процесса (входные, выходные параметры), модели теплообмена.

Чтобы открыть программу, следует выбрать «Setup» в структурной схеме модуля Fluid Flow (CFX) (рисунок 6).

Главным моментом в определении физики задачи является выбор типа анализа «Analysis Type» в окне «Outline». В данном случае при решении нестационарной задачи следует выбирать тип анализа «Transient». Так же задается полная продолжительность физического процесса «Total time», шаг времени «Timesteps» и начальное время «Initial Time».

Поскольку решается нестационарная задача, важно точно определять теплоемкость алюминия в точке входа в модель, для соответствия подаваемого количества энергии натурным условиям. Правило изменения теплоемкости в окрестности точки «солидуса» не играет существенной роли для определения поля температур.

Расчетная геометрия упрощена – убраны фаски на кристаллизаторе и залитом алюминии с сохранением площади поперечного сечения бруска алюминия. Отсутствует матрица, под которой происходит процесс прессования металла. Связано это с тем, что под матрицу алюминий должен попадать с температурой на 1-2°С ниже температуры «солидуса», а условием моделирования процесса для нахождения угла поворота кристаллизатора является достижение алюминием точки с температурой «солидуса» равной для чистого алюминия 660°С. Отсутствует тигель с дозатором, через который заливается расплав.

В постановке задачи алюминий заливается в фиксированной, относительно корпуса, точке в кристаллизатор. Вращение кристаллизатора переносит алюминий до матрицы. Для моделирования данного эффекта в компьютерной модели задается вращение домена кристаллизатора. Домен алюминия и корпуса остаются неподвижными. Однако, для моделирования переноса алюминия, на граничное условие Inlet подается жидкий алюминий с массовым расходом, соответствующим скорости вращения кристаллизатора, приблизительно 7 г/с при плотности 2.7 г/см³. На граничном условии Outlet

задается выход алюминия из модели с соответствующим расходом. Температура окружающей среды составляет 20°C.

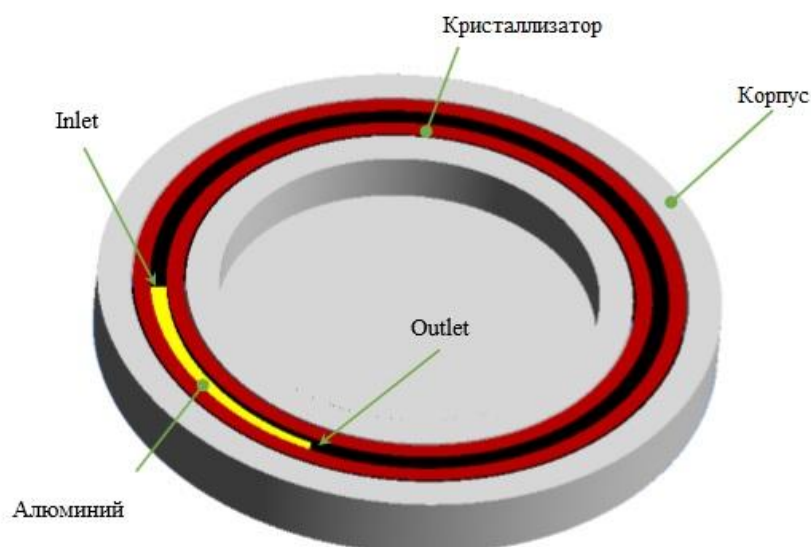


Рисунок 10 – Компьютерная модель установки непрерывного литья и прессования цветных металлов

Домен «алюминий» описывается при помощи модели несжимаемой жидкости, решается система уравнений Навье-Стокса и уравнение теплопроводности. Домены «корпус» и «кристаллизатор» описываются при помощи модели теплопередачи внутри твердого тела, решается только стационарное уравнение теплопроводности.

Чтобы задать параметры для всей расчетной области нужно создать домен, выбрав *Insert -> Domain* в панели главного меню. Откроется окно с деталями. Во вкладке «Basic Settings» выбираем расчетную область в поле «Location». В данном случае их три. Задаем тип расчетной области – жидкость «Fluid Domain» - для расплава алюминия и «Solid Domain» для корпуса и кристаллизатора. Вещество – алюминий и сталь, соответственно для каждого из доменов выбираем материал («Material» – «Aluminium» и «Steel»). Во вкладке «Material Properties» задаём свойства для каждого материала. В поле «Equation of State» задаем значение молярной массы и плотности вещества. В поле

«Specific Heat Capacity» – удельную теплоемкость. В поле «Reference State» – значения для температуры и давления. В поле «Transport Properties» – значение динамической вязкости «Dynamic Viscosity» и коэффициент теплопроводности «Thermal Conductivity». В «Buoyancy Properties» – коэффициент теплового расширения «Thermal Expansivity».

Для домена кристаллизатор требуется задать вращение модели в поле «Domain Motion» следует выбрать «Rotating», ввести угловую скорость вращения и ось, относительно которой вращается модель.

При переходе во вкладку «Fluid Models» во вкладке «Heat Transfer» следует выбрать изотермический процесс «Isothermal», ламинарное течение «Laminar».

Для определения начальных условий необходимо перейти во вкладку «Initialization». Определяются начальные значения для компонентов вектора скорости, относительное давление «Relative Pressure» принимается равным нулю, начальная температура расплава алюминия равна 750 °С.

Для наложения на модель граничного условия нужно выбрать *Insert -> Boundary* . Появится окно для задания параметров граничного условия. Во вкладке «Basic Settings» выбираем тип «Boundary Type» и область граничного условия. Во вкладке «Boundary Details» следует выбрать параметры для массы и моментов потока жидкости «Mass And Momentum» и тип теплопередачи «Heat Transfer».

С поверхностей корпуса и кристаллизатора задаётся тепловой поток «Heat Flux» [W/m²].

На стенках канавки кристаллизатора задается тип граничного условия – стенка «Wall». Условие прилипания – «No Slip Wall».

В области входа расплава в кристаллизатор задается тип граничных условий – «Inlet», и указывается величина массового расхода расплава. На выходе задаётся граничное условие - «Outlet» с таким же массовым расходом.

В итоге представляется физическая модель задачи.

CFX-Pre также позволяет настроить параметры для вывода данных. Для этого следует перейти в окне «Outline» в «Output Control». В случае нестационарной задачи панель управления выводом позволяет управлять, какие данные будут записываться в файлы вывода и с каким промежутком времени. Результаты могут быть написаны на особых стадиях решения при записи резервных файлов после заданного числа итераций. Данные мониторинга позволяют также показывать процесс решения задачи в реальном времени.

Для записи результатов в определенные моменты времени следует перейти во вкладку «Tm Results», добавить новый элемент (item), и выбрать нужные параметры для записи «Output Variables List». Также следует указать интервал времени между записями «Time Interval». Нам интересуется полная температура с интервалом в 1 секунду. Закрываем CFX-pre.

CFX-Solver Manager представляет собой графический интерфейс пользователя, который позволяет задавать параметры для вычислений: управлять процессом решения CFX-Solver в интерактивном режиме, определять входные данные файла решателя, запускать или приостанавливать CFX-Solver, контролировать процесс решения задачи, устанавливать решатель для проведения параллельных вычислений.

Чтобы открыть его, в окне Workbench следует выбрать «Solution» в структурной схеме модуля Fluid Flow (CFX) (рисунок 6). В появившемся диалоговом окне можно настроить некоторые параметры решения задачи и запустить CFX-Solver Manager. После завершения вычислений будет записан общий файл результатов и файлы интересующих нас параметров (компоненты скорости и полная температура) для заданных моментов времени. Это основные данные, которые будут использованы и обработаны в CFD-Post.

CFX-Solver Manager (рисунок 11) может интерполировать решение данных текущей сеточной модели на новую сеточную модель. Также позволяет экспортировать файл результатов в другие форматы данных.

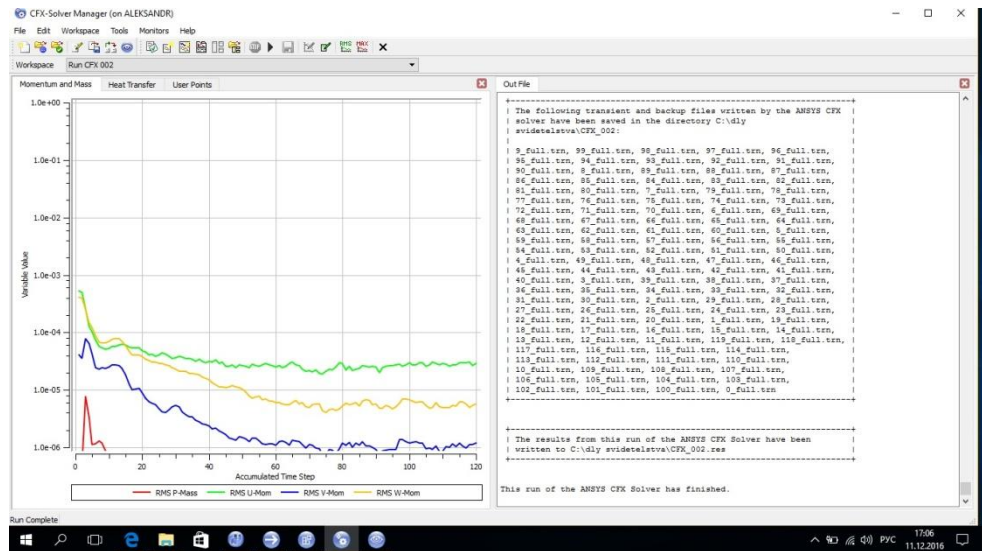


Рисунок 11 – Окно CFX-Solver Manager

ANSYS CFD-Post – это программа, предназначенная для анализа, визуализации и представления результатов, полученных в ходе решения задачи посредством ANSYS CFX-Solver. Для этого используются следующие средства:

- визуализация геометрии и исследуемых областей;
- векторные графики для визуализации направления и величины потоков;
- визуализация изменения скалярных величин (такие как температура, давление) внутри исследуемой области.

Графики, изображения и видео, полученные в результате анализа решения задачи можно сохранить в виде отдельных файлов.

Чтобы открыть CFD-Post, в окне Workbench следует выбрать «Results» в структурной схеме модуля Fluid Flow (CFX) (рисунок 6).

Для начала введем график линий уровня с использованием цветной градиентной заливки «Contour Plot» на интересующую нас поверхность, выбрав *Insert -> Contour* . С помощью «Contour Plot» можно будет посмотреть изменение какой-либо физической величины в данной области (рисунок 12).

В окне «Details» следует выбрать область и переменную для построения графика. Так же можно выбрать число контуров прорисовки для точности. Для того чтобы посмотреть поле температуры в конкретный момент времени,

следует перейти в *Tools* -> *Timestep Selector* и выбрать момент времени из списка.

Для наблюдения за изменением процесса во времени есть функция, позволяющая делать анимации. Надо перейти в *Tools* -> *Animation*. В открывшемся окне нужно выбрать объекты для анимации «Timesteps», можно регулировать скорость анимации, количество просмотров, и сохранить анимацию в различных форматах видео.

Также можно поменять настройки цветовой шкалы «Legend»: изменить расположение шкалы в окне просмотра «3D Viewer», выбрать переменную, формат текста и прочее.

CFD-Post позволяет построить график зависимости какой-либо величины от времени в некоторой точке.

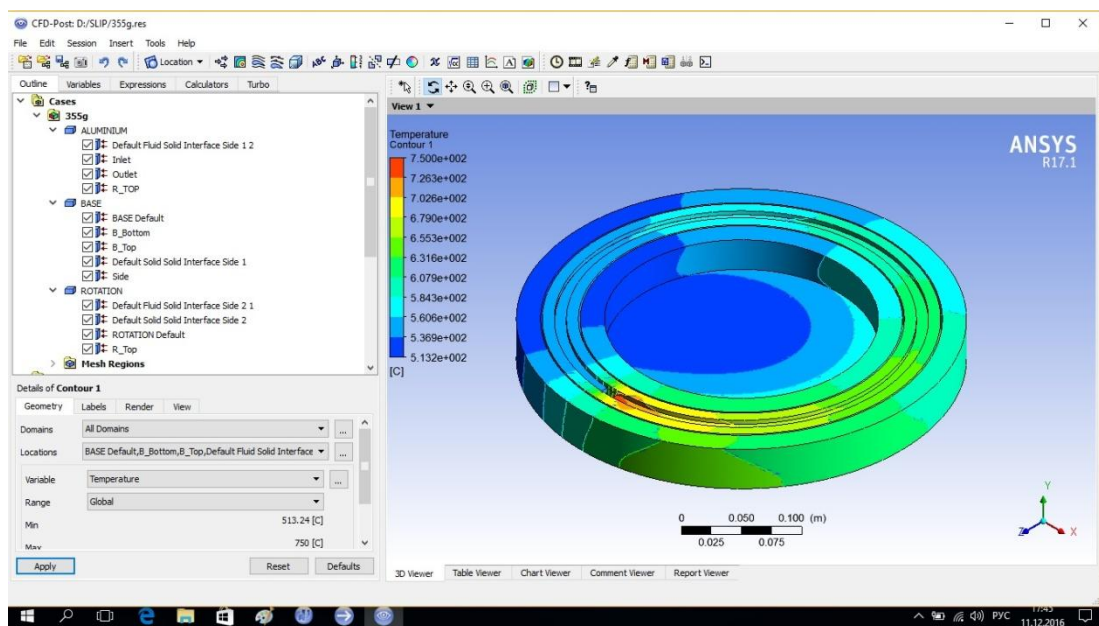


Рисунок 12 – Распределение температуры в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов

Чтобы добавить график, следует выбрать *Insert* -> *Chart*. В окне «Details» во вкладке «General» надо выбрать тип графика «XY – Transient» (т.е. зависимость от времени), добавить заголовок графика. В следующей вкладке «Data Series» в поле «Location» выбрать точку наблюдения температуры. Во

вкладке «Y Axis» в качестве переменной «Variable» выбрать интересующую нас величину. Нажав кнопку «Apply», построится график зависимости от времени в точке. Нажав кнопку «Export», можно экспортировать данные в точке в качестве таблицы значений.

Функция экспорта данных CFD-Post позволяет экспортировать значения необходимых переменных в каждом узле в интересующей области в один определенный момент времени. Формируется текстовый документ с колонками значений в каждом узле. Для этого надо выбрать *File -> Export -> Export*. Откроется окно с параметрами экспорта, где во вкладке «Option» можно указать название и формат файла вывода, интересующую область модели и требуемые переменные. Во вкладке «For-matting» можно выбрать точность значений, а также определить тип разделителя для колонок в файле вывода.

Эта функция экспорта позволяет экспортировать файл данных только для одного конкретного момента времени. Чтобы экспортировать файл данных для всех моментов времени, следует использовать функцию сессий, иначе потребуется вручную делать экспорт файлов данных для каждого момента времени.

Программный код расчётной модели для изучения теплового процесса при кристаллизации алюминиевых сплавов представлен в Приложении А.

Для исследуемого процесса граничные и начальные условия формируются в следующем виде:

Начальные условия: температура заливаемого расплава АК-12, АД-31 и чистого алюминия постоянна $t_p = \text{const} = 750^\circ\text{C}$.

Температура окружающей среды $t_{\text{окр. ср.}} = 25^\circ\text{C}$

Скорость вращения домена «Rotation» - 2 об/мин.

Температура элементов установки в начальный момент времени $t_{\text{эл.}} = 25^\circ\text{C}$.

Математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений сохранения энергии.

Уравнение энергии включает члены, отвечающие за внутреннее тепловыделение при обработке сплавов АК-12, АД-31 и чистого алюминия в процессе кристаллизации.

$$c\rho \frac{dT}{dt} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) + S_h, \quad (2.1)$$

где S_h - внутренние тепловыделения при фазовом переходе, учитывается при решении уравнения теплопроводности в домене «Aluminium»

Учёт внутреннего источника тепловыделения при фазовом переходе расплава из жидкой фазы в твёрдую, входящего в величину S_h , осуществляется путём введения эффективного коэффициента теплоёмкости

$$S_h = \int_{T_{liq}}^{T_{sol}} c_p(T) dT + L, \quad (2.2)$$

В модели теплота плавления L отдельно не учитывалась, а включалась в зависимость теплоёмкости от температуры (эффективная теплоёмкость) в виде

$$c_{eff}(T) = c_p(T) + \bar{c}_p(T), \quad (2.3)$$

где $\bar{c}_p(T)$ – добавочный член, отвечающий за внутреннее тепловыделение.

Причём эффективная теплоёмкость является характеристикой тепловых процессов с фазовыми переходами, зависящей в кристаллизующейся зоне от доли твёрдой фазы ψ .

$$c_{eff}(T) = \begin{cases} c_{ж} \text{ при } t > t_{liq} \\ c_{ж}(1 - \psi) + c_{т}\psi + q_k \frac{\partial \psi}{\partial t} \text{ при } t_s \leq t \leq t_{liq} \\ c_{т} \text{ при } t < t_c \end{cases} \quad (2.4)$$

Для остальных доменов «Case» и «Rotation» решается уравнение теплопроводности.

$$c\rho \frac{dT}{dt} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T), \quad (2.5)$$

Граничные условия задачи представлены на рисунке 13.

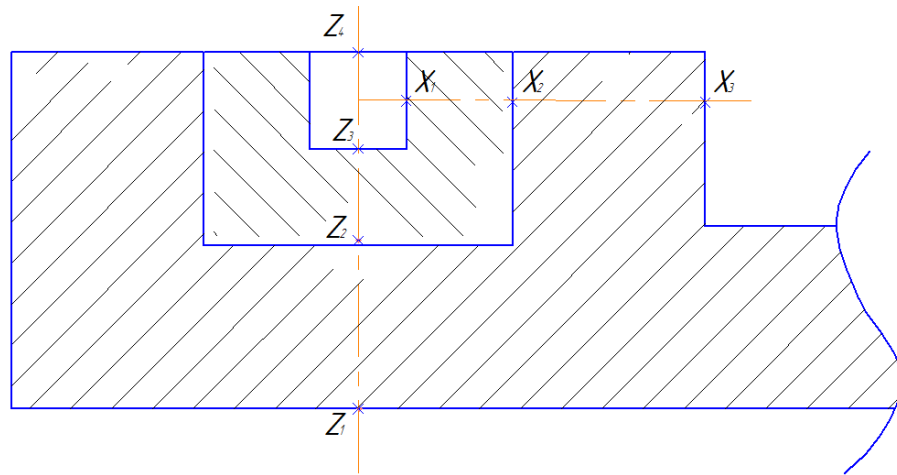


Рисунок 13 – Граничные условия в направлении осей Z и X

Граничные условия в направлении оси Z:

$$\lambda(t) \frac{dt}{dz} \Big|_{z_1} = \alpha_k + \alpha_{\text{изл}} \quad (2.6)$$

$$\lambda(t) \frac{dt}{dz} \Big|_{z_2} = \alpha_{\text{кр}} \cdot (t_{\text{кр}} - t_{\text{кор}}) \quad (2.7)$$

$$\lambda(t) \frac{dt}{dz} \Big|_{z_3} = \alpha_p \cdot (t_p - t_{\text{кр}}) \quad (2.8)$$

$$\lambda(t) \frac{dt}{dz} \Big|_{z_4} = \alpha_k + \alpha_{\text{изл}} \quad (2.9)$$

Граничные условия в направлении оси X:

$$\lambda(t) \frac{dt}{dx} \Big|_{x_1} = \alpha_p \cdot (t_p - t_{\text{кр}}) \quad (2.10)$$

$$\lambda(t) \frac{dt}{dx} \Big|_{x_2} = \alpha_{\text{кр}} \cdot (t_{\text{кр}} - t_{\text{кор}}) \quad (2.11)$$

$$\lambda(t) \frac{dt}{dx} \Big|_{x_3} = \alpha_k + \alpha_{\text{изл}} \quad (2.12)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией,

$\alpha_{\text{изл}}$ – коэффициент теплоотдачи излучением,

α_p – коэффициент теплоотдачи расплава,

$t_{\text{кр}}$ – температура кристаллизатора,

$t_{\text{кор}}$ – температура корпуса,

t_p – температура расплава.

2.4 Результаты моделирования теплового процесса кристаллизации в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов

В результате компьютерного моделирования процесса непрерывного литья были получены зависимости изменения угла затвердевания φ_s от времени работы установки непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов. Полученные в процессе расчётного исследования графики для сплава АК-12, сплава АД-31 и чистого алюминия приведены на рисунках 14-16.

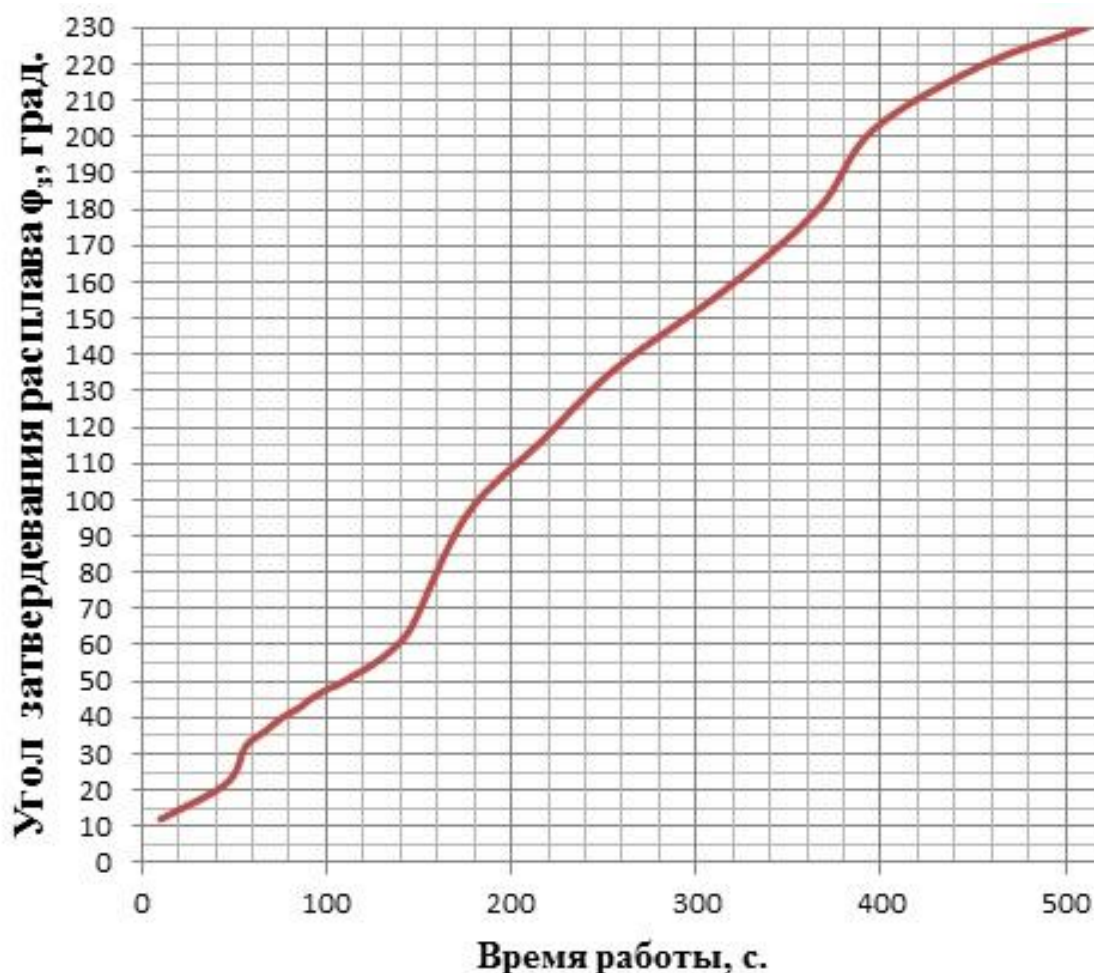


Рисунок 14 – Изменение угла затвердевания расплава φ_s в переходном тепловом режиме работы установки для сплава АК-12

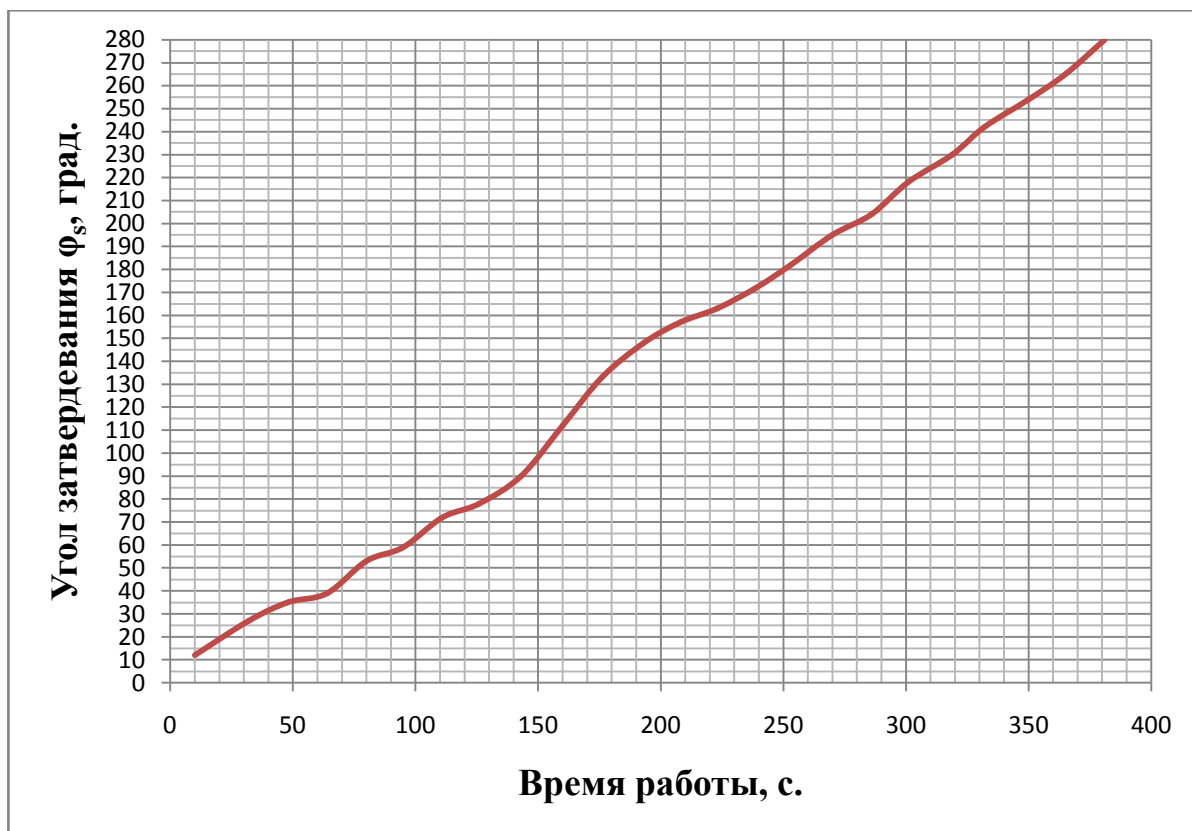


Рисунок 15 – Изменение угла затвердевания расплава ϕ_3 в переходном тепловом режиме работы установки для сплава АД-31

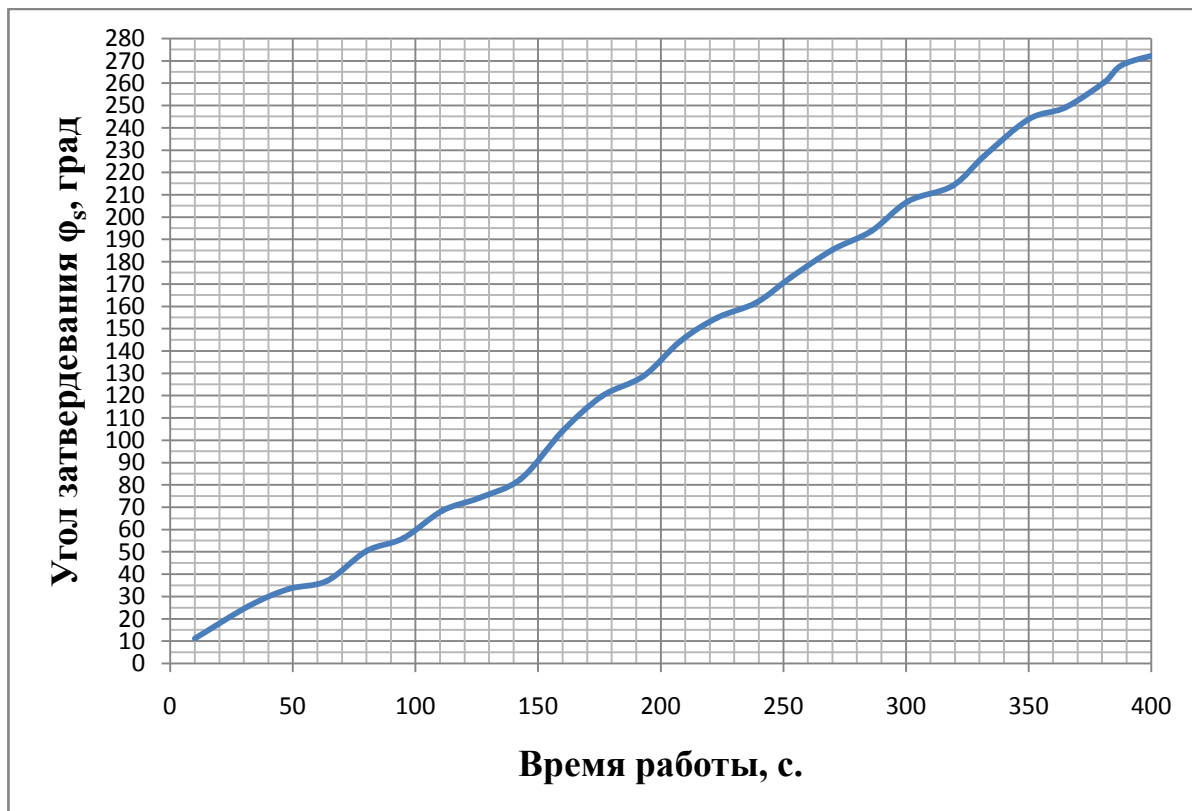


Рисунок 16 – Изменение угла затвердевания расплава ϕ_3 в переходном тепловом режиме работы установки для чистого алюминия

Таким образом, в результате моделирования процесса непрерывного литья были получены зависимости изменения угла затвердевания φ_s от времени работы установки непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов для сплавов АК-12, АД-31 и чистого алюминия. На рисунке 17 приведен общий график, отображающий изменение угла затвердевания трех исследуемых сплавов.

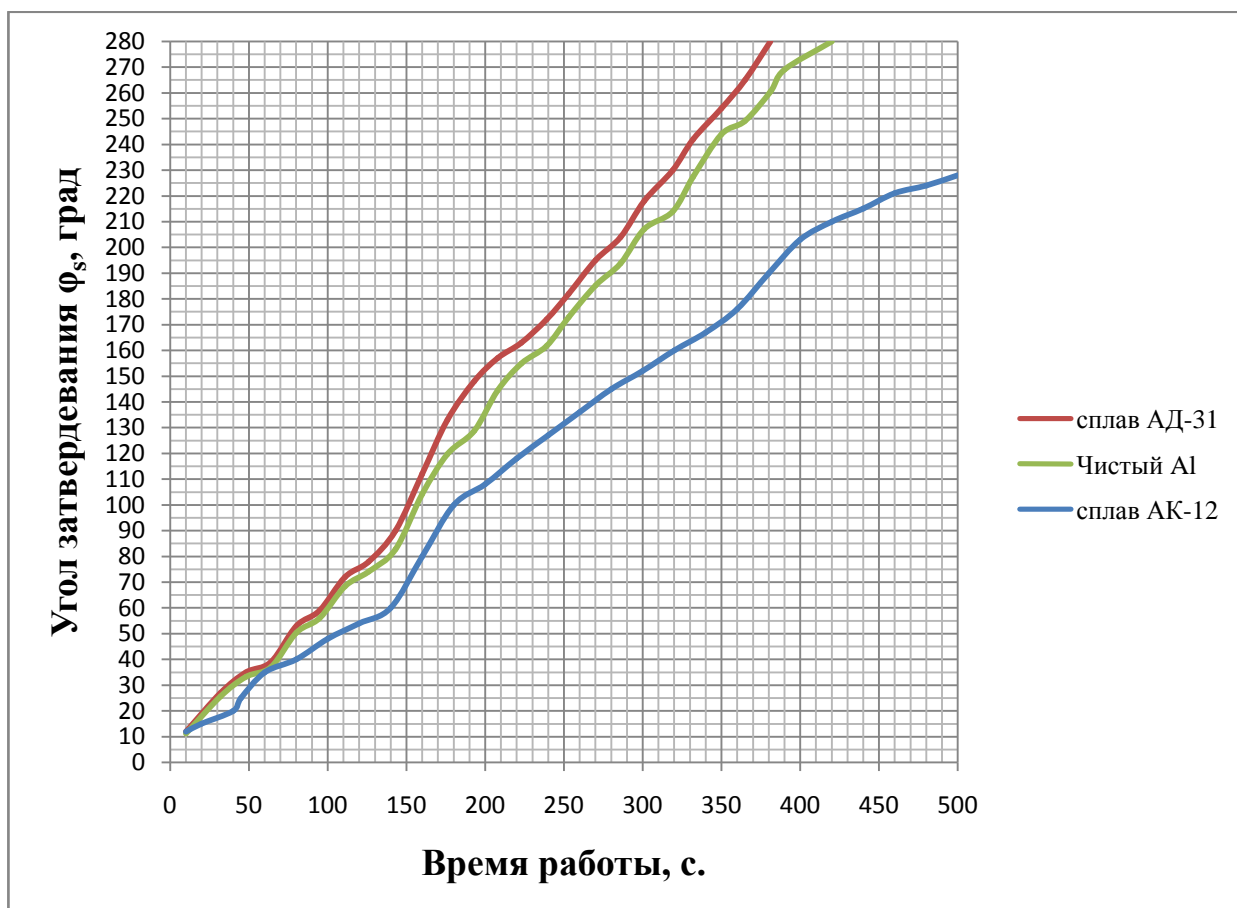


Рисунок 17 – Общий график изменения угла затвердевания исследуемых расплавов φ_s в переходном тепловом режиме работы установки

Как видно из рисунка 17, кривая затвердевания сплава АК-12 находится ниже кривых затвердевания остальных исследуемых металлов. Данное явление обуславливается меньшей теплопроводностью сплава АК-12 по сравнению с иными сплавами, а также тем, что температура «солидуса» сплава АК-12 существенно ниже относительно остальных расплавов.

В ходе анализа полученных зависимостей на рисунке 17, установлено, что кривые затвердевания сплава АД-31 и чистого алюминия имеют схожий характер изменения угла затвердевания. Кривая затвердевания сплава АД-31 имеет более крутой характер, поскольку сплав АД-31 имеет длительный фазовый переход от температуры «ликвидуса» до температуры «солидуса» относительно чистого алюминия, фазовый переход которого протекает при одной температуре 660 °С. Поэтому при кристаллизации сплава АД-31 выделяется большее количество тепла при фазовом переходе.

2.5 Выводы по главе

Поскольку в настоящее время теория работы установки непрерывного литья и прессования цветных металлов изучена недостаточно, необходимо использовать современные методы расчета, а также компьютерное моделирование с целью описания и исследования работы указанной установки.

Для исследования тепловой работы установки непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов в переходном режиме было проведено компьютерное моделирование процесса кристаллизации расплава в программном комплексе Ansys CFX.

В результате компьютерного моделирования в программном комплексе Ansys CFX была создана модель непрерывного литья алюминия и алюминиевых сплавов.

В результате компьютерного моделирования было определено распределение температуры в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов в процессе кристаллизации, также на основе данной модели были получены зависимости изменения угла затвердевания φ_s от времени работы установки непрерывного литья и прессования для сплава АК-12, сплава АД-31 и чистого алюминия.

3. Экспериментальное исследование установки непрерывного литья и прессования цветных металлов

3.1 Описание и порядок проведения эксперимента

Экспериментальное исследование проводилось на сплавах марки АК-12, АД-31 и чистого алюминия.

Подготовительный этап проводимого эксперимента состоит из следующих стадий:

1. Демонтаж дугообразного сегмента с матрицей и замена его на плуг (для исследования изменения дуги кристаллизации расплава).

2. Очистка от грязи, пыли и остатков металла с предыдущих запусков с поверхности кристаллизатора.

3. Размещение тиглей с алюминиевым сплавом, дозатора и подставки для разогрева до температуры $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ в печи электросопротивления.

4. Выдерживание алюминиевого сплава в печи в течение $5\div 6$ минут по достижению необходимой температуры.

5. Установка разогретых деталей установки в рабочее положение, чтобы не допустить замерзания расплава в начальный момент работы установки.

6. Холостой пуск установки, чтобы определить правильность установки подставки и направления вращения кристаллизатора.

Эксперимент проводился следующим образом: После холостого пуска установки, убедившись в правильности сборки, тигель с расплавом извлекают из плавильной печи, очищают от шлака, замеряется его температура. Включается вращение кристаллизатора (скорость вращения составляет 2 об/мин). Далее расплавленный металл заливается в разогретый тигель с дозатором, установленный на подставке. Расплав через дозатор заполняет канавку колеса-кристаллизатора. По мере его движения расплав кристаллизуется, затвердевшая часть упирается в плуг и выходит из канавки. Контактной термопарой промерялась температура от места заливки и до места выхода металла из канавки, после чего термопара снова устанавливалась в

месте заливки. Температура заливаемого расплава составляла 750°C, тигель с дозатором и подставкой 742-746°C (в разных сериях экспериментов), колесо-кристаллизатор и плуг предварительно не нагревались. Фиксация температуры производилась каждую секунду.

3.2 Результаты экспериментального исследования

Результаты экспериментального исследования работы установки непрерывного литья и прессования цветных металлов представлены на рисунке 18 для сплава АК-12, на рисунке 19 для сплава АД-31, и на рисунке 20 для чистого алюминия.

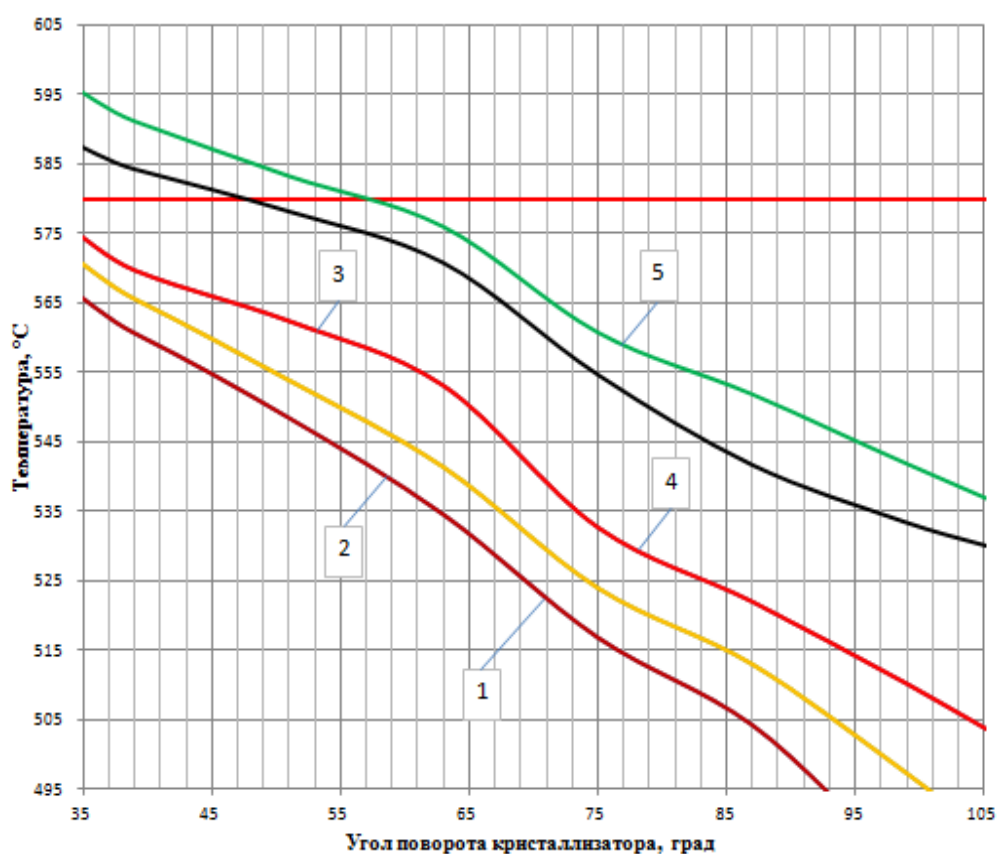


Рисунок 18 – Изменение температуры обрабатываемого металла в процессе кристаллизации расплава АК-12 при различном угле поворота кристаллизатора: линии 1, 2, 3, 4 и 5 – соответственно 1, 2, 3, 4 и 5 оборотов кристаллизатора

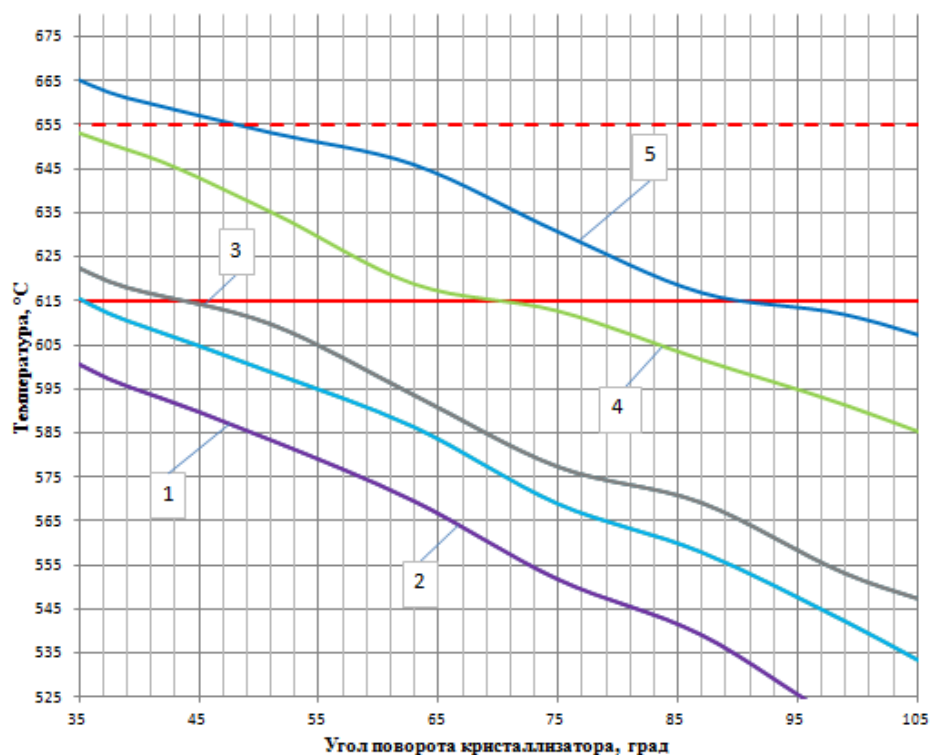


Рисунок 19 – Изменение температуры обрабатываемого металла в процессе кристаллизации расплава АД-31 при различном угле поворота кристаллизатора: линии 1, 2, 3, 4 и 5 – соответственно 1, 2, 3, 4 и 5 оборотов кристаллизатора

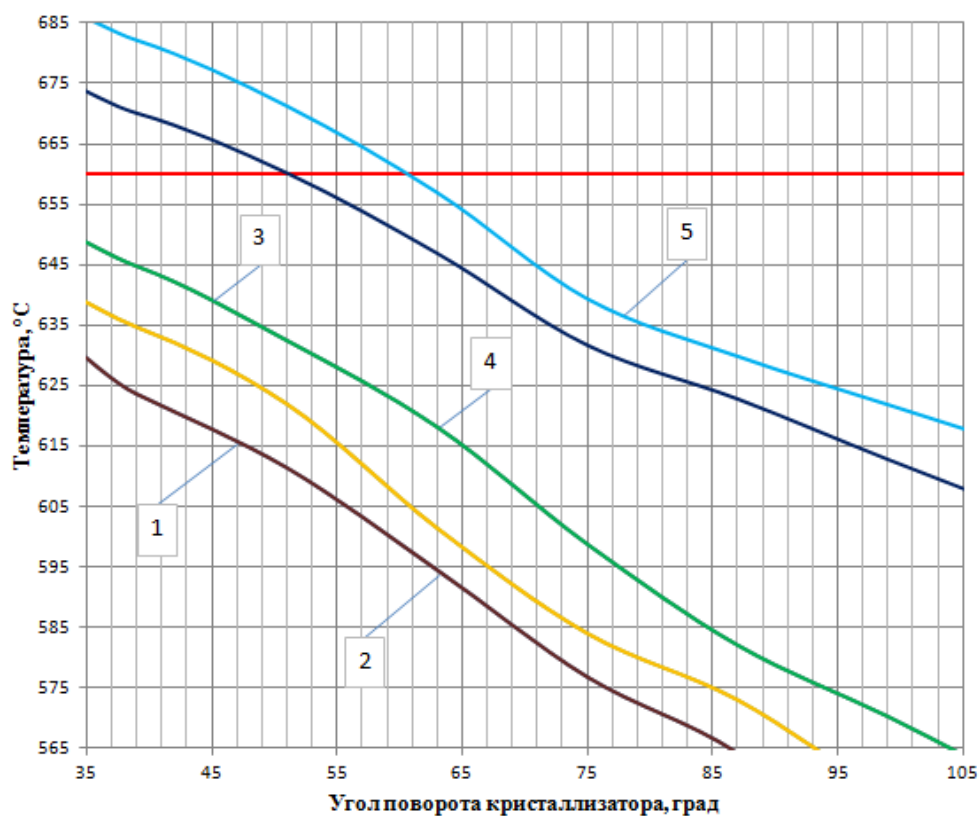


Рисунок 20 – Изменение температуры обрабатываемого металла в процессе

кристаллизации расплава чистого алюминия при различном угле поворота кристаллизатора: линии 1, 2, 3, 4 и 5 – соответственно 1, 2, 3, 4 и 5 оборотов кристаллизатора

На рисунке 18 изображены кривые отображающие зависимости температуры обрабатываемого металла от угла поворота кристаллизатора с расплавом.

На графике чётко прослеживается изменение длины дуги кристаллизации расплава. С каждым оборотом установки кривые изменяют свой угол наклона в сторону горизонтальной прямой.

Красной линией на графиках отмечены температуры «солидуса» для исследуемых сплавов. Штрих-пунктирной красной линией для сплава АД-31 обозначена линия «ликвидус». Выше этой линии расплав находится в жидкой фазе. Каждые две линии соответствуют одному обороту кристаллизатора. На графиках изображены результаты эксперимента 5 оборотов установки (1-ый, 3-ий, 5-ый, 7-ой, 9-ый обороты из 9 оборотов установки).

Эксперимент проводился в течение 4,5 минут. Время эксперимента было ограничено объёмом расплавленного металла. Прослеживается связь изменения длины дуги кристаллизации расплава от времени работы установки.

Как видно из графиков в начальный момент времени, после запуска установки, при взаимодействии с холодным кристаллизатором, расплав мгновенно кристаллизовался.

Первые кривые, при отсчёте снизу, лежат ниже линии «солидуса». Связано это с тем, что при контакте расплавленного металла, выливаемого из дозатора, с холодным кристаллизатором расплав мгновенно кристаллизуется. Поэтому в начальный момент работы установки угол затвердевания φ_s имеет небольшие значения. С каждым оборотом кристаллизатора, по мере его нагрева φ_s увеличивается.

3.3 Сравнение результатов экспериментального исследования с компьютерным расчетом

Проанализировав полученные результаты эксперимента и сравнив их с расчётным исследованием на компьютерной модели, прослеживалось удовлетворительное качественное и количественное совпадение температурных зависимостей, что подтверждает адекватность модели непрерывного литья цветных металлов.

Для сплава АК-12 в ходе эксперимента спустя $\tau=75$ секунд работы установки угол $\varphi_s=33^\circ$, при $\tau=155$ секунд $\varphi_s=57^\circ$, при $\tau=218$ секунд $\varphi_s=97^\circ$. При моделировании в том же временном интервале $\varphi_s=40^\circ$, $\varphi_s=74^\circ$, и $\varphi_s=116^\circ$.

Для сплава АД-31 в ходе эксперимента спустя $\tau=75$ секунд работы установки угол $\varphi_s=48^\circ$, при $\tau=155$ секунд $\varphi_s=95^\circ$, при $\tau=218$ секунд $\varphi_s=157^\circ$. При моделировании в том же временном интервале $\varphi_s=51^\circ$, $\varphi_s=106^\circ$, и $\varphi_s=161^\circ$.

Для чистого алюминия в ходе эксперимента спустя $\tau=75$ секунд работы установки угол $\varphi_s=33^\circ$, при $\tau=155$ секунд $\varphi_s=73^\circ$, при $\tau=218$ секунд $\varphi_s=117^\circ$. При моделировании в том же временном интервале $\varphi_s=48^\circ$, $\varphi_s=95^\circ$, и $\varphi_s=152^\circ$.

Расхождения в изменении угла затвердевания φ_s между экспериментом и расчётом главным образом связаны с тем, что при расчётном исследовании необходимая температура «солидуса» определялась во всем сечении кристаллизующегося металла, а не в одной точке, как это происходило при замере температуры термопарой в эксперименте.

3.4. Выводы по главе

Для подтверждения результатов расчета компьютерной модели было проведено экспериментальное исследование тепловой работы установки непрерывного литья и прессования цветных металлов в процессе кристаллизации.

В результате проведенных экспериментов для сплавов АК-12, АД-31 и чистого алюминия была определена зависимость изменения температуры обрабатываемого металла от угла поворота кристаллизатора установки.

Сравнительный анализ полученных результатов экспериментального исследования и компьютерного моделирования показал удовлетворительное качественное и количественное совпадение температурных зависимостей, что подтверждает адекватность модели непрерывного литья цветных металлов.

Заключение

В результате выполнения магистерского диссертационного исследования были получены следующие результаты:

1. Изучены современные способы непрерывного процесса литья и обработки металлов давлением;
4. Создана компьютерная модель теплообмена в установке непрерывного литья алюминия и алюминиевых сплавов;
2. Проведено компьютерное моделирование процесса кристаллизации алюминия и алюминиевых сплавов в установке непрерывного литья и прессования с горизонтальным кристаллизатором в программном комплексе Ansys;
4. Определено распределение температуры в установке непрерывного литья и прессования алюминия и алюминиевых сплавов с горизонтальным кристаллизатором в процессе кристаллизации;
5. Проанализировано изменение угла кристаллизации от времени для исследуемых сплавов АК-12, АД-31 и чистого алюминия;
6. Проведено экспериментальное исследование процесса кристаллизации алюминия и алюминиевых сплавов в установке непрерывного литья и прессования, подтверждающее адекватность компьютерной модели;

Список использованных источников

1. Горбунов, Ю.А. Состояние и перспективы развития технологий производства деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов на заводах РФ / Ю.А. Горбунов // Цветные металлы-2010: сб. науч. ст. – Красноярск: Версо, 2010. – С. 656–662.
2. Горбунов, Ю.А. Опыт внедрения и перспективы применения алюминиевых сплавов при производстве и модернизации изделий транспортных систем на заводах РФ / Ю.А. Горбунов // Цветные металлы-2011: сб. науч. ст. – Красноярск: Версо, 2011. – С. 546–553.
3. Маркушев, М.В. Структура и свойства алюминиевого сплава 1560 после интенсивной пластической деформации угловым прессованием и прокаткой / М.В. Маркушев, М.Ю. Мурашкин // Материаловедение. – 2004. - № 8. - С. 38.
4. Горбунов, Ю.А. Состояние и проблемы развития производства алюминиевых сплавов с недендритной тиксотропной структурой и полуфабрикатов из них методами деформации в твердожидком состоянии / Ю.А. Горбунов // Цветные металлы-2011: сб. науч. ст. – Красноярск: Версо, 2011. – С. 554–560.
5. Бережной, В.Л. Базовые технологии и оборудование будущего в производстве пресс-изделий / В.Л. Бережной // Технология легких сплавов. – 2006. – № 1–2. – С. 52–60.
6. 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.
7. Бережной, В.Л. Комплексы и линии для прессования легких сплавов / В.Л. Бережной // Энциклопедия «Машиностроение», том IV – М.: Машиностроение, 2005. – С. 488–494.

8. Федоров, М.В. Алюминий и алюминиевые полуфабрикаты на внутреннем рынке / М.В. Федоров // *Металлоснабжение и сбыт.* - 2002. – июнь – С. 86–91.
9. Бережной, В.Л. Технологически многоцелевое прессование с позитивно–активным трением / В.Л. Бережной // *Цветные металлы.* – 2001. – № 2. – С. 41–47.
10. Щерба, В.Н. Прессование алюминиевых сплавов / В.Н. Щерба. – М.: *Интермет–Инжиниринг*, 2001. – 768 с.
11. Мурашко, Р.Е. Современное состояние и тенденции развития гидростатического прессования порошков // Р.Е. Мурашко, А.Н. Курович, Р.Р. Саубанов // *Тяжелое машиностроение.* – 2007. – № 1. – С. 25–30.
12. Бережной, В.Л. Предпосылки к использованию холодного прессования на машиностроительных заводах / В.Л. Бережной // *Технология легких сплавов.* – 2009. – № 3. – С. 102–109.
13. Агапитова, О.Ю. Совершенствование процесса гидромеханического выдавливания цветных металлов / Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 2011. – № 4. – С. 50–55.
14. Луговской, В.М. Горячая и холодная обработка материалов жидкостью сверхвысокого давления / В.М. Луговской, Г. Даниели // *Металлург.* – 2011. – № 3. – С. 65–68.
15. Бережной, В.Л. К разработке бесконтейнерного прессования для деформационного передела слитков-столбов / В.Л. Бережной // *Технология легких сплавов.* – 2011. – № 1. – С. 73–80.
16. Сидельников, С.Б. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов : монография / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Н.Н. Загиров. – М.: *МАКС Пресс*, 2005. – 344 с.
17. Довженко, Н.Н. Прессование алюминиевых сплавов: моделирование и управление тепловыми условиями: монография / Н. Н. Довженко, С.В. Беляев, С.Б. Сидельников [и др.]. – Красноярск: *Сиб. федер. ун-т*, 2009. – 256 с.

18. Пат. 86513 Российская Федерация, МКП В 21 С 23/08. Устройство для непрерывного прессования порошковых материалов / Горохов Ю.В., Солопко И.В.; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 25.

19. Пат. 96798 Российская Федерация, МКП В 21 С 23/08. Устройство для непрерывного прессования / Горохов Ю.В., Черкашин М.А., Крылов М.А.; опубл. 20.08.2010. Бюл. № 23.

20. Напалков, В.И. Непрерывное литье алюминиевых сплавов: справочник / В.И. Напалков, Г.В. Черепок, С.В. Махов, Ю.М. Черновол. – М.: Интернет Инжиниринг, 2005. – 512 с.

21. 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.

22. Пат. 102550 Российская Федерация, МКП В 21 С 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.

23. Сидельников, С.Б. Разработка совмещенных процессов литья-прокатки-прессования и программного обеспечения их проектирования с целью повышения эффективности производства пресс-изделий из алюминия и его сплавов: дисс. ... д-ра. техн. наук : 05.16.05 / С.Б. Сидельников; ГУЦМиЗ. – Красноярск, 2005. – 424 с.

24. Сидельников, С.Б. Разработка проекта установки совмещенного литья и прокатки прессования / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Р.И. Галиев [и др.] // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2005. – С. 33–42.

25. Пат. 2100136 РФ, МКП В 22 D 11/06, В 21 С 23/00. Установка для непрерывного литья и прессования / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Ешкин А.В. – Опубл. 27.12.1997, Бюл. № 36. – 6 с.

26. Пат. 2200644 РФ, МПК В22D11/06, В21С23/08. Устройство для непрерывного литья и прессования полых профилей / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Гришечкин А.И. [и др.]. – Оpubл. 20.03.2003, Бюл. № 8. – 6 с.

27. Горохов, Ю.В. Расчет параметров деформационной зоны при непрерывном прессовании способом Конформ / Ю.В. Горохов, Н.Н. Загиров, И.Ю. Губанов // *Металлы*. – 2004. – № 4. – С. 113–116.

28. Любанова, А.Ш. Оптимизация равномерности течения металла при непрерывном прессовании способом Conform. / А.Ш. Любанова, Ю.В. Горохов, И.В. Солопко, А.Ю. Зиборов / Оптимизация равномерности течения металла при непрерывном прессовании способом Conform. // *Металлы*. – 2010. – № 2. – С. 28–33.

29. Горохов, Ю.В. Особенности пластического течения материала заготовки в деформационной зоне при непрерывном прессовании способом Конформ / Ю.В. Горохов, И.В. Солопко, В.П. Сулов [и др.] // *Цветные металлы*. – 2010. – № 12. – С. 69–71.

30. Грищенко, Н.А. Механические свойства алюминиевых сплавов: монография / Н.А. Грищенко, С.Б. Сидельников, И.Ю. Губанов [и др.]. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 196 с.

31. Баузер, М. Технология прессования металлов, пер. с немецкого / М. Баузер, М. Зауер, К. Зигерт. - М.: АЛЮСИЛ МВиТ, 2009. – 918 с.

32. Пат. 96041 Российская Федерация, МКП В 22 D 11/06, В 21 С 23/00. Устройство для непрерывного литья и прессования / Солопко И.В., Горохов Ю.В.; опубл. 20.07.2010, Бюл. № 20.

33. Пат. 102550 Российская Федерация, МКП В 22 D 11/06, В 21 С 23/00. Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла / Беляев С.В., Сидельников С.Б., Горохов Ю.В. [и др.]; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 7.

34. Горохов, Ю.В. Экспериментальная установка для совмещения непрерывного литья и прессования цветных металлов на базе карусельного кристаллизатора / Ю.В. Горохов, И.В. Солопко, В.П. Катрюк // *Цветные*

металлы–2011: сб. науч. ст. третьего Международного конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2011. – С. 579–581.

35. 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.

36. Солопко, И.В. Расчет температурных полей при кристаллизации расплава в ручье приводного колеса при непрерывном литье-прессовании методом Конформ / И.В. Солопко, Н.Н Довженко, Н.А. Нестеров [и др.]. // Высокие технологии, исследования, промышленность.: сб. статей XI Международной науч.-прак. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности», Т.4. – 2011. Санкт-Петербург: / под ред. А.П. Кудинова. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 313–319.

37. Горохов, Ю.В. Экспериментальная установка для совмещения непрерывного литья и прессования цветных металлов на базе карусельного кристаллизатора / Ю.В. Горохов, И.В. Солопко, В.П. Катрюк // Цветные металлы-2011: сб. науч. ст. третьего Международного конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2011. - С. 579–581.

38. Горохов, Ю.В. Оптимизация размеров инструмента при непрерывном прессовании Конформ / Ю.В. Горохов, И.В. Солопко / Свидетельство о гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ №2010613104 от 11.05.2010.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Программный код расчётной модели для изучения теплового процесса при кристаллизации алюминиевых сплавов.

{Нестационарный режим}

COMMENT:User Data

Comment Exists = True

Comment Heading = User Data

Heading Level = 1

END

CONTOUR:Contour 1

Apply Instancing Transform = On

Clip Contour = Off

Colour Map = Default Colour Map

Colour Scale = Linear

Colour Variable = Temperature

Colour Variable Boundary Values = Hybrid

Constant Contour Colour = Off

Contour Range = Global

Culling Mode = No Culling

Domain List = /DOMAIN GROUP:All Domains

Draw Contours = On

Font = Sans Serif

Fringe Fill = On

Instancing Transform = /DEFAULT INSTANCE TRANSFORM:Default Transform

Lighting = On

Line Colour = 0, 0, 0

Line Colour Mode = Default

Line Width = 1

Location List = BASE Default,B_Bottom,B_Top,Default Fluid Solid Interface \ Side 1 2,Default Fluid Solid Interface Side 2 1,Default Solid Solid Interface \ Side 1,Default Solid Solid Interface Side 2,Inlet,Outlet,ROTATION Default,R_TOP,\ R_Top,Side

Max = 0.0 [C]

Min = 0.0 [C]

Number of Contours = 11

Show Numbers = Off

Specular Lighting = On

Surface Drawing = Smooth Shading

Text Colour = 0, 0, 0

Text Colour Mode = Default

Text Height = 0.024

Transparency = 0.0

Use Face Values = Off
Value List = 0 [C],1 [C]
Visibility = On
OBJECT VIEW TRANSFORM:
Apply Reflection = Off
Apply Rotation = Off
Apply Scale = Off
Apply Translation = Off
Principal Axis = Z
Reflection Plane Option = XY Plane
Rotation Angle = 0.0 [degree]
Rotation Axis From = 0 [m], 0 [m], 0 [m]
Rotation Axis To = 0 [m], 0 [m], 0 [m]
Rotation Axis Type = Principal Axis
Scale Vector = 1 , 1 , 1
Translation Vector = 0 [m], 0 [m], 0 [m]
X = 0.0 [m]
Y = 0.0 [m]
Z = 0.0 [m]

END

END

DATA READER:

Active Case Name = Case CFX_002
Append Results = False
Apply X Offset = false
Apply Y Offset = false
Apply Z Offset = false
Clear All Objects = False
Construct Variables From Fourier Coefficients = True
Current Case List = Case CFX_002
Current Case Name = C:/dly svidetelstva/CFX_002.res
Current Results File = C:/dly svidetelstva/CFX_002.res
Current Timestep = -1
Current Timevalue = 113
Edit Case Names = false
File Angle Units = rad
File Chemical Amount Units = mol
File Current Units = A
File Length Units = m
File Light Units = cd
File Mass Units = kg
File Money Units = GBP
File Solid Angle Units = sr
File Temperature Units = K
File Time Units = s

Force File Reload = False
Keep Camera Position = True
Load Particle Tracks = true
Multi Configuration File Load Option = Last Case
Open in New View = true
Open to Compare = false
Reference Acoustic Pressure = 2.0e-5 [Pa]
Reference Length = 1.0 [m]
Reference Velocity = 1.0 [m s⁻¹]
Timestep Match Criterion = Same Step
Timestep Sync Mode = By Time Value
Timevalue Match Criterion = Same Value
CASE:Case CFX_002
Construct Variables From Fourier Coefficients = True
Current Case Name = C:/dly svidetelstva/CFX_002.res
Current Results File = C:/dly svidetelstva/CFX_002.res
Current Timestep = 113
Current Timevalue = 113
Domains to Load = ALUMINIUM, BASE, ROTATION
File Angle Units = rad
File Chemical Amount Units = mol
File Current Units = A
File Length Units = m
File Light Units = cd
File Mass Units = kg
File Money Units = GBP
File Solid Angle Units = sr
File Temperature Units = K
File Time Units = s
Multi Configuration File Load Option = Last Case
BOUNDARY:BASE Default
Apply Instancing Transform = On
Apply Texture = Off
Blend Texture = On
Colour = 0.2, 0.5, 1
Colour Map = Default Colour Map
Colour Mode = Constant
Colour Scale = Linear
Colour Variable Boundary Values = Hybrid
Culling Mode = No Culling
Draw Faces = On
Draw Lines = Off
Instancing Transform = Default Transform
Lighting = true
Line Colour = 0, 0, 0

Line Colour Mode = Default
 Line Width = 1
 Range = Global
 Render Edge Angle = 0 [degree]
 Specular Lighting = On
 Surface Drawing = Smooth Shading
 Texture Angle = 0
 Texture Direction = 0.0, 1.0, 0.0
 Texture Material = Metal
 Texture Position = 0.0, 0.0
 Texture Scale = 1.0
 Texture Type = Predefined
 Tile Texture = Off
 Transform Texture = Off
 Transparency = 0.0
 Visibility = false
 END
 BOUNDARY:B_Bottom
 Apply Instancing Transform = On
 Apply Texture = Off
 Blend Texture = On
 Colour = 0.2, 0.5, 1
 Colour Map = Default Colour Map
 Colour Mode = Constant
 Colour Scale = Linear
 Colour Variable Boundary Values = Hybrid
 Culling Mode = No Culling
 Draw Faces = On
 Draw Lines = Off
 Instancing Transform = Default Transform
 Lighting = true
 Line Colour = 0, 0, 0
 Line Colour Mode = Default
 Line Width = 1
 Range = Global
 Render Edge Angle = 0 [degree]
 Specular Lighting = On
 Surface Drawing = Smooth Shading
 Texture Angle = 0
 Texture Direction = 0.0, 1.0, 0.0
 Texture Material = Metal
 Texture Position = 0.0, 0.0
 Texture Scale = 1.0
 Texture Type = Predefined
 Tile Texture = Off

Transform Texture = Off
 Transparency = 0.0
 Visibility = false
 END
 BOUNDARY:B_Top
 Apply Instancing Transform = On
 Apply Texture = Off
 Blend Texture = On
 Colour = 0.2, 0.5, 1
 Colour Map = Default Colour Map
 Colour Mode = Constant
 Colour Scale = Linear
 Colour Variable Boundary Values = Hybrid
 Culling Mode = No Culling
 Draw Faces = On
 Draw Lines = Off
 Instancing Transform = Default Transform
 Lighting = true
 Line Colour = 0, 0, 0
 Line Colour Mode = Default
 Line Width = 1
 Range = Global
 Render Edge Angle = 0 [degree]
 Specular Lighting = On
 Surface Drawing = Smooth Shading
 Texture Angle = 0
 Texture Direction = 0.0, 1.0, 0.0
 Texture Material = Metal
 Texture Position = 0.0, 0.0
 Texture Scale = 1.0
 Texture Type = Predefined
 Tile Texture = Off
 Transform Texture = Off
 Transparency = 0.0
 Visibility = false
 END
 BOUNDARY:**Inlet**
 Apply Instancing Transform = On
 Apply Texture = Off
 Blend Texture = On
 Colour = 0.2, 0.5, 1
 Colour Map = Default Colour Map
 Colour Mode = Constant
 Colour Scale = Linear
 Colour Variable Boundary Values = Hybrid

Culling Mode = No Culling
Draw Faces = On
Draw Lines = Off
Instancing Transform = Default Transform
Lighting = true
Line Colour = 0, 0, 0
Line Colour Mode = Default
Line Width = 1
Range = Global
Render Edge Angle = 0 [degree]
Specular Lighting = On
Surface Drawing = Smooth Shading
Texture Angle = 0
Texture Direction = 0.0, 1.0, 0.0
Texture Material = Metal
Texture Position = 0.0, 0.0
Texture Scale = 1.0
Texture Type = Predefined
Tile Texture = Off
Transform Texture = Off
Transparency = 0.0
Visibility = false

END

BOUNDARY:Outlet

Apply Instancing Transform = On
Apply Texture = Off
Blend Texture = On
Colour = 0.2, 0.5, 1
Colour Map = Default Colour Map
Colour Mode = Constant
Colour Scale = Linear
Colour Variable Boundary Values = Hybrid
Culling Mode = No Culling
Draw Faces = On
Draw Lines = Off
Instancing Transform = Default Transform
Lighting = true
Line Colour = 0, 0, 0
Line Colour Mode = Default
Line Width = 1
Range = Global
Render Edge Angle = 0 [degree]
Specular Lighting = On
Surface Drawing = Smooth Shading
Texture Angle = 0

Texture Direction = 0.0, 1.0, 0.0
 Texture Material = Metal
 Texture Position = 0.0, 0.0
 Texture Scale = 1.0
 Texture Type = Predefined
 Tile Texture = Off
 Transform Texture = Off
 Transparency = 0.0
 Visibility = false
 END
 BOUNDARY:ROTATION Default
 Apply Instancing Transform = On
 Apply Texture = Off
 Blend Texture = On
 Colour = 0.2, 0.5, 1
 Colour Map = Default Colour Map
 Colour Mode = Constant
 Colour Scale = Linear
 Colour Variable Boundary Values = Hybrid
 Culling Mode = No Culling
 Draw Faces = On
 Draw Lines = Off
 Instancing Transform = Default Transform
 Lighting = true
 Line Colour = 0, 0, 0
 Line Colour Mode = Default
 Line Width = 1
 Range = Global
 Render Edge Angle = 0 [degree]
 Specular Lighting = On
 Surface Drawing = Smooth Shading
 Texture Angle = 0
 Texture Direction = 0.0, 1.0, 0.0
 Texture Material = Metal
 Texture Position = 0.0, 0.0
 Texture Scale = 1.0
 Texture Type = Predefined
 Tile Texture = Off
 Transform Texture = Off
 Transparency = 0.0
 Visibility = false
 END
 BOUNDARY:R_TOP
 Apply Instancing Transform = On
 Apply Texture = Off

Blend Texture = On
Colour = 0.2, 0.5, 1
Colour Map = Default Colour Map
Colour Mode = Constant
Colour Scale = Linear
Colour Variable Boundary Values = Hybrid
Culling Mode = No Culling
Draw Faces = On
Draw Lines = Off
Instancing Transform = Default Transform
Lighting = true
Line Colour = 0, 0, 0
Line Colour Mode = Default
Line Width = 1
Range = Global
Render Edge Angle = 0 [degree]
Specular Lighting = On
Surface Drawing = Smooth Shading
Texture Angle = 0
Texture Direction = 0.0, 1.0, 0.0
Texture Material = Metal
Texture Position = 0.0, 0.0
Texture Scale = 1.0
Texture Type = Predefined
Tile Texture = Off
Transform Texture = Off
Transparency = 0.0
Visibility = false

END

BOUNDARY:R_Top

Apply Instancing Transform = On
Apply Texture = Off
Blend Texture = On
Colour = 0.2, 0.5, 1
Colour Map = Default Colour Map
Colour Mode = Constant
Colour Scale = Linear
Colour Variable Boundary Values = Hybrid
Culling Mode = No Culling
Draw Faces = On
Draw Lines = Off
Instancing Transform = Default Transform
Lighting = true
Line Colour = 0, 0, 0
Line Colour Mode = Default

Line Width = 1
 Range = Global
 Render Edge Angle = 0 [degree]
 Specular Lighting = On
 Surface Drawing = Smooth Shading
 Texture Angle = 0
 Texture Direction = 0.0, 1.0, 0.0
 Texture Material = Metal
 Texture Position = 0.0, 0.0
 Texture Scale = 1.0
 Texture Type = Predefined
 Tile Texture = Off
 Transform Texture = Off
 Transparency = 0.0
 Visibility = false
 END
 BOUNDARY:Side
 Apply Instancing Transform = On
 Apply Texture = Off
 Blend Texture = On
 Colour = 0.2, 0.5, 1
 Colour Map = Default Colour Map
 Colour Mode = Constant
 Colour Scale = Linear
 Colour Variable Boundary Values = Hybrid
 Culling Mode = No Culling
 Draw Faces = On
 Draw Lines = Off
 Instancing Transform = Default Transform
 Lighting = true
 Line Colour = 0, 0, 0
 Line Colour Mode = Default
 Line Width = 1
 Range = Global
 Render Edge Angle = 0 [degree]
 Specular Lighting = On
 Surface Drawing = Smooth Shading
 Texture Angle = 0
 Texture Direction = 0.0, 1.0, 0.0
 Texture Material = Metal
 Texture Position = 0.0, 0.0
 Texture Scale = 1.0
 Texture Type = Predefined
 Tile Texture = Off
 Transform Texture = Off

Transparency = 0.0
Visibility = false
END
COMPOSITE:Assembly 2
Apply Instancing Transform = On
Apply Texture = Off
Blend Texture = On
Colour = 1, 0.5, 0
Colour Map = Default Colour Map
Colour Mode = Constant
Colour Scale = Linear
Colour Variable Boundary Values = Hybrid
Culling Mode = No Culling
Draw Faces = On
Draw Lines = Off
Instancing Transform = Default Transform
Lighting = true
Line Colour = 0, 0, 0
Line Colour Mode = Default
Line Width = 1
Range = Global
Render Edge Angle = 0 [degree]
Specular Lighting = On
Surface Drawing = Smooth Shading
Texture Angle = 0
Texture Direction = 0.0, 1.0, 0.0
Texture Material = Metal
Texture Position = 0.0, 0.0
Texture Scale = 1.0
Texture Type = Predefined
Tile Texture = Off
Transform Texture = Off
Transparency = 0.0
Visibility = false
END

COMPOSITE:NS_A_Top 2
Apply Instancing Transform = On
Apply Texture = Off
Blend Texture = On
Colour = 1, 0.5, 0
Colour Map = Default Colour Map
Colour Mode = Constant
Colour Scale = Linear
Colour Variable Boundary Values = Hybrid
Culling Mode = No Culling

Draw Faces = On
Draw Lines = Off
Instancing Transform = Default Transform
Lighting = true
Line Colour = 0, 0, 0
Line Colour Mode = Default
Line Width = 1
Range = Global
Render Edge Angle = 0 [degree]
Specular Lighting = On
Surface Drawing = Smooth Shading
Texture Angle = 0
Texture Direction = 0.0, 1.0, 0.0
Texture Material = Metal
Texture Position = 0.0, 0.0
Texture Scale = 1.0
Texture Type = Predefined
Tile Texture = Off
Transform Texture = Off
Transparency = 0.0
Visibility = false
END
COMPOSITE:NS_B_Bottom 2
Apply Instancing Transform = On
Apply Texture = Off
Blend Texture = On
Colour = 1, 0.5, 0
Colour Map = Default Colour Map
Colour Mode = Constant
Colour Scale = Linear
Colour Variable Boundary Values = Hybrid
Culling Mode = No Culling
Draw Faces = On
Draw Lines = Off
Instancing Transform = Default Transform
Lighting = true
Line Colour = 0, 0, 0
Line Colour Mode = Default
Line Width = 1
Range = Global
Render Edge Angle = 0 [degree]
Specular Lighting = On
Surface Drawing = Smooth Shading
Texture Angle = 0
Texture Direction = 0.0, 1.0, 0.0

Texture Material = Metal
 Texture Position = 0.0, 0.0
 Texture Scale = 1.0
 Texture Type = Predefined
 Tile Texture = Off
 Transform Texture = Off
 Transparency = 0.0
 Visibility = false
 END
 COMPOSITE:NS_B_Top 2
 Apply Instancing Transform = On
 Apply Texture = Off
 Blend Texture = On
 Colour = 1, 0.5, 0
 Colour Map = Default Colour Map
 Colour Mode = Constant
 Colour Scale = Linear
 Colour Variable Boundary Values = Hybrid
 Culling Mode = No Culling
 Draw Faces = On
 Draw Lines = Off
 Instancing Transform = Default Transform
 Lighting = true
 Line Colour = 0, 0, 0
 Line Colour Mode = Default
 Line Width = 1
 Range = Global
 Render Edge Angle = 0 [degree]
 Specular Lighting = On
 Surface Drawing = Smooth Shading
 Texture Angle = 0
 Texture Direction = 0.0, 1.0, 0.0
 Texture Material = Metal
 Texture Position = 0.0, 0.0
 Texture Scale = 1.0
 Texture Type = Predefined
 Tile Texture = Off
 Transform Texture = Off
 Transparency = 0.0
 Visibility = false
 END
 COMPOSITE:NS_Inlet 2
 Apply Instancing Transform = On
 Apply Texture = Off
 Blend Texture = On

Colour = 1, 0.5, 0
Colour Map = Default Colour Map
Colour Mode = Constant
Colour Scale = Linear
Colour Variable Boundary Values = Hybrid
Culling Mode = No Culling
Draw Faces = On
Draw Lines = Off
Instancing Transform = Default Transform
Lighting = true
Line Colour = 0, 0, 0
Line Colour Mode = Default
Line Width = 1
Range = Global
Render Edge Angle = 0 [degree]
Specular Lighting = On
Surface Drawing = Smooth Shading
Texture Angle = 0
Texture Direction = 0.0, 1.0, 0.0
Texture Material = Metal
Texture Position = 0.0, 0.0
Texture Scale = 1.0
Texture Type = Predefined
Tile Texture = Off
Transform Texture = Off
Transparency = 0.0
Visibility = false

END

COMPOSITE:NS_Outlet 2

Apply Instancing Transform = On
Apply Texture = Off
Blend Texture = On
Colour = 1, 0.5, 0
Colour Map = Default Colour Map
Colour Mode = Constant
Colour Scale = Linear
Colour Variable Boundary Values = Hybrid
Culling Mode = No Culling
Draw Faces = On
Draw Lines = Off
Instancing Transform = Default Transform
Lighting = true
Line Colour = 0, 0, 0
Line Colour Mode = Default
Line Width = 1

Range = Global
Render Edge Angle = 0 [degree]
Specular Lighting = On
Surface Drawing = Smooth Shading
Texture Angle = 0
Texture Direction = 0.0, 1.0, 0.0
Texture Material = Metal
Texture Position = 0.0, 0.0
Texture Scale = 1.0
Texture Type = Predefined
Tile Texture = Off
Transform Texture = Off
Transparency = 0.0
Visibility = false
END

DEFORMATION INFO:

Deformation Scale = 1
END

FILE PROCESSING:

Path Stack = .
Processing Mode = None
Supress File Replacement Warnings = false
END

LIBRARY:

CEL:

EXPRESSIONS:

Accumulated Time Step = 113
Angular Velocity = 0.20944 [radian s⁻¹]
Current Time Step = 113
Reference Pressure = 1 [atm]
Sequence Step = 113
TavgA1 = volumeAve(T)@REGION:B238
TavgB = volumeAve(T)@REGION:B219
TavgR = volumeAve(T)@REGION:B267
Tavgout = areaAve(T)@REGION:NS_Outlet 2
Time = 113 [s]
atstep = Accumulated Time Step
ctstep = Current Time Step
omega = Angular Velocity
sstep = Sequence Step
t = Time
END
END

END
MASS FLOW CALC OPTION ON PHYSICAL SURFACES:
Option = Interpolated
END

REPORT:

Report Items = /TITLE PAGE,/REPORT/FILE INFORMATION
OPTIONS,/REPORT/MESH \
STATISTICS OPTIONS,/REPORT/PHYSICS SUMMARY
OPTIONS,/REPORT/SOLUTION SUMMARY \
OPTIONS,/COMMENT:User Data

FILE INFORMATION OPTIONS:

Include In Report = true
This Exists = true

END

MESH STATISTICS OPTIONS:

Include In Report = true
Show Connectivity Number = false
Show Edge Length Ratio = false
Show Element Volume Ratio = false
Show Max Face Angle = false
Show Min Face Angle = false
Show Number of Elements = true
Show Number of Hexahedra = false
Show Number of Nodes = true
Show Number of Polyhedra = false
Show Number of Pyramids = false
Show Number of Tetrahedra = false
Show Number of Wedges = false
This Exists = true

END

PHYSICS SUMMARY OPTIONS:

Include In Report = true
Show Boundary Physics = true
Show Domain Physics = true
This Exists = true

END

PREVIEW:

This Exists = true

OUTPUT SETTINGS:

Chart Image Type = png
Chart Size = Same As Figure
Custom Chart Size Height = 384
Custom Chart Size Width = 512
Custom Figure Size Height = 384

Custom Figure Size Width = 512
Figure Image Type = png
Figure Size = 512 x 384
Fit Views = false
This Exists = true
END
END

PUBLISH:

Default Report Name = Report
Generate CVF = false
Report Format = HTML
Report Path = ./Report.htm
Save Images In Separate Folder = true
This Exists = true

OUTPUT SETTINGS:

Chart Image Type = png
Chart Size = Same As Figure
Custom Chart Size Height = 384
Custom Chart Size Width = 512
Custom Figure Size Height = 384
Custom Figure Size Width = 512
Figure Image Type = png
Figure Size = 512 x 384
Fit Views = false
This Exists = true

END
END

SOLUTION SUMMARY OPTIONS:

Include In Report = false
Show Boundary Flow Summary = true
Show Force and Torque Summary = false
Show Forces = true
Show Torques = true
This Exists = true

END
END

UNIT SYSTEM:

Custom Units Setting = Angle,degree,Force,N,Length,m,Mass,kg,Pressure,Pa,\
Temperature,C,Time,s,Velocity,m s⁻¹,Acceleration,m s⁻²,Angular Velocity,radian
\ s⁻¹,Angular Acceleration,radian s⁻²,Area,m²,Chemical Amount,mol,\
Compressibility,Pa⁻¹,Concentration,m⁻³,Contact Resistance,m² s kg⁻¹,Current,\
A,Decay Constant,s⁻¹,Density,kg m⁻³,Density Derivative wrt Pressure,m⁻² s²,\
Density Derivative wrt Temperature,kg m⁻³ K⁻¹,Dielectric Contact Resistance,\

$F^{-1} m^2$, Dynamic Viscosity, Pa s, Electric Charge, A s, Electric Charge Density, A s m^{-3} , Electric Charge Transfer Coefficient, F m^{-2} , Electric Current Density, A m^{-2} ,
 Electric Current Transfer Coefficient, A $m^{-2} V^{-1}$, Electric Current Source, A m^{-3} ,
 Electric Field, V m^{-1} , Electrical Conductivity, S m^{-1} , Electrical Contact Resistance, ohm m^2 ,
 Electrical Permittivity, A s $V^{-1} m^{-1}$, Electrical Resistivity, ohm m, Energy, J, Energy Source, W m^{-3} ,
 Energy Source Coefficient, W $m^{-3} K^{-1}$, Enthalpy Variance, $m^4 s^{-4}$, Epsilon, $m^2 s^{-3}$, Epsilon Flux, W $m^{-2} s^{-1}$,
 Epsilon Flux Coefficient, kg $m^{-2} s^{-2}$, Epsilon Source, W $m^{-3} s^{-1}$, Epsilon Source Coefficient, kg $m^{-3} s^{-2}$,
 Flame Surface Density Source, $m^{-1} s^{-1}$, Fracture Energy, J m^{-2} , Frequency, Hz, Heat Flux in, W m^{-2} ,
 Heat Transfer Coefficient, W $m^{-2} K^{-1}$, Interphase Transfer Coefficient, kg $m^{-2} s^{-1}$, Inverse Angle, degree $^{-1}$,
 Inverse Area, m^{-2} , Inverse Length, m^{-1} , k, $m^2 s^{-2}$, k Flux, W m^{-2} , k Flux Coefficient, kg $m^{-2} s^{-1}$,
 k Source, W m^{-3} , k Source Coefficient, kg $m^{-3} s^{-1}$, Kinematic Diffusivity, $m^2 s^{-1}$, Luminance, cd,
 Magnetic Field, A m^{-1} , Magnetic Flux, Wb, Magnetic Flux Density, T, Magnetic Induction, T, Magnetic Potential, T m,
 Magnetic Permeability, H m^{-1} , Mass Concentration, kg m^{-3} , Mass Concentration Rate, kg $m^{-3} s^{-1}$,
 Mass Flow, kg s^{-1} , Mass Flow in, kg s^{-1} , Mass Flux, kg $s^{-1} m^{-2}$, Mass Flux Coefficient, kg $s^{-1} m^{-2}$,
 Mass Flux Pressure Coefficient, kg $s^{-1} m^{-2} Pa^{-1}$, Mass Fraction, kg kg $^{-1}$, Mass Moment of Inertia, kg m^2 ,
 Mass Source, kg $s^{-1} m^{-3}$, Mass Source Coefficient, kg $s^{-1} m^{-3} Pa^{-1}$, Total Mass Source Pressure Coefficient, kg $s^{-1} Pa^{-1}$,
 Molar Concentration, mol m^{-3} , Molar Concentration Henry Coefficient, Pa $m^3 mol^{-1}$, Molar Concentration Rate, mol $m^{-3} s^{-1}$,
 Molar Energy, J mol $^{-1}$, Molar Entropy, J mol $^{-1} K^{-1}$, Molar Fraction, mol mol $^{-1}$, Molar Mass, kg kmol $^{-1}$,
 Molar Volume, $m^3 mol^{-1}$, Moment, N m, Momentum Source, kg $m^{-2} s^{-2}$, Momentum Source Lin Coeff, kg $m^{-3} s^{-1}$,
 Momentum Source Quad Coeff, kg m^{-4} , Money, GBP, Omega Source, kg $m^{-3} s^{-2}$, Per Mass, kg $^{-1}$, Per Mass Flow, s kg $^{-1}$,
 Per Time, s^{-1} , Pressure Derivative wrt Temperature, Pa K $^{-1}$, Pressure Derivative wrt Volume, Pa kg m^{-3} ,
 Power, W, Shear Strain Rate, s^{-1} , Shock Velocity, s m^{-1} , Solid Angle, sr, Soot Cross Coefficient, $m^3 mol^{-1} s^{-1}$,
 Soot PX Factor, mol $^1 kg^{-1} s^{-1}$, Specific, kg kg $^{-1}$, Specific Concentration, mol kg $^{-1}$, Specific Energy, J kg $^{-1}$,
 Specific Enthalpy, J kg $^{-1}$, Specific Entropy, J kg $^{-1} K^{-1}$, Specific Flame Surface Density, $m^2 kg^{-1}$,
 Specific Heat Capacity, J kg $^{-1} K^{-1}$, Specific Volume, kg $^{-1} m^3$, Surface Charge Density, A s m^{-2} , Surface Tension, N m^{-1} ,
 InvTemp1, K $^{-1}$, InvTemp2, K $^{-2}$, InvTemp3, K $^{-3}$, InvTemp4, K $^{-4}$, Temperature Variance, K 2 ,
 Temperature Variance Source, kg $m^{-3} s^{-1} K^2$, Thermal Conductivity, W $m^{-1} K^{-1}$, Thermal Contact Resistance, W $^{-1} m^2 K$,
 Thermal Expansivity, K $^{-1}$, Torque, N m, Torsional Spring Constant, N m radian $^{-1}$, Total Radiative Intensity, W $m^{-2} sr^{-1}$,

Turbulent Heat Flux, $m^3 s^{-3}$, Voltage, V, Volume, m^3 , Volumetric, $kg m^{-3}$, Volumetric \ Flow, $m^3 s^{-1}$, Volumetric Flow in, $m^3 s^{-1}$, Number Source, $m^{-3} s^{-1}$
Preferred Units System = Custom
Update Units to Preferred = Off
END